



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Natalja Ajupova

**SOOJUSÕPETUSE PRAKTILINE ÜLESANNE
VABAKONVEKTSIOONI UURIMISEKS**

**FREE CONVECTION AS PRACTICAL TASK IN THERMAL
ENGINEERING**

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: Külli Hovi, *MSc*
Mart Hovi, *MSc*

Tartu 2021

LÜHIKOKKUVÕTE

Eesti Maaülikool F.R.Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Natalja Ajupova		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Soojusõpetuse praktiline ülesanne vabakonveksiooni uurimiseks			
Lehekülgi: 45	Jooniseid: 17	Tabeleid: 7	Lisasid: 3
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond: 4.17 Energeetikaalased uuringud; CERCS: T140 Energeetika Juhendaja(d): Külli Hovi, <i>MSc</i> ; Mart Hovi, <i>MSc</i> Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2021			
<p>Vaba konveksiooni praktiline uurimine pakub huvi, kuna see võimaldab paremini mõista soojusülekanne protsessi. See on oluline aspekt peamiselt hoonete kütte- ja ventilatsioonisüsteemide projekteerimisel, samuti muudes valdkondades, kus tehnoloogiate areng aitab kaasa uute lahenduste otsimisele soojusülekanne valdkonnas.</p> <p>Antud töös püütakse simuleerida konveksiooniprotsessi silindrikujulise keha ümber ja võrrelda konveksiooni intensiivsust vertikaalses ja horisontaalses asendis. Kirjeldatakse katseseadme arendamise ja valmistamise protsessi. Katseseade koosneb viiest silindrist, mille kereks on alumiiniumtoru, sisse paigutatud kütteelement vasktraadist, vaheruumala on täidetud peeneteraliste liivaga. Tehtud katseseeria ja saadud mõõtmistulemuste põhjal arvutatud konveksiooni iseloomustavad peamised parameetrid: soojusülekandetegur, Grashofi, Prandtl ja Nusselti arvud.</p> <p>Kuna praktiliste testide tulemused osutusid vastuolulisteks, ei olnud võimalik ühemõttelisi järeldusi teha. Kuid käesolevas töös esitatud materjale, katseseadme kirjeldust, metoodikat ja tulemuste analüüsi saab kasutada edasises praktilises töös.</p>			
Märksõnad: soojusülekanne, soojusülekandetegur, soojusvool, laminaarne voolamine			

ABSTRACT

Estonian University of Life Sciences F.R.Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Natalja Ajupova		Curriculum: Engineering	
Title: Free Convection as Practical Task in Thermal Engineering			
Pages: 45	Figures: 17	Tables: 7	Appendixes: 3
Department: Energy Engineering Field of research: 4.17 Energetic research; CERCS code: T140 Energy research Supervisors: Külli Hovi, <i>MSc</i> ; Mart Hovi, <i>MSc</i> Place and date: Tartu 2021			
<p>Practical research of free convection is interesting as it ensures better understanding of heat transfer processes. It is of crucial importance for the development of heating and ventilation systems in different buildings, as well as for other fields of study where innovative technologies help find new solutions to make heat transfer processes more efficient. In the present research, an attempt was made to simulate convection processes around a cylindrical body and compare convection intensity in the vertical and horizontal positions. Both the development and actual manufacturing of the test device are described in the present paper. The device consists of five cylinders which bodies are made of aluminium pipes with copper wires placed inside them as heating elements and fine sand filling the space between the cylinders. During a series of tests, the required measurements were conducted and the main convection parameters, i.e. heat transfer coefficient, Grashof, Prandtl, and Nusselt numbers, were calculated. Due to the fact that test results were relatively controversial, it was impossible to draw uniform conclusions. However, the description of the test device, the methods applied and the analysis of the results can be used for further research and practical purposes.</p>			
Keywords: free convection, heat transfer coefficient, heat flow, laminar flow			

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE.....	2
ABSTRACT	3
SISSEJUHATUS	6
1. SOOJUSLEVI.....	7
1.1. Soojuslevi viisid.....	7
1.2. Kiirguslik soojuslevi	8
1.3. Konduktiivne soojuslevi.....	9
1.4. Konvektiivne soojuslevi	11
1.4.1. Konveksiooni olemus ja põhiprobleem	11
1.4.2. Konveksiooni soojusülekanalitegur.....	12
1.4.3. Sarnasuse teooria ja sarnasusarvud	13
1.4.4. Vabakonveksiooni võrrand.	15
2. KATSESEADE.....	17
2.1. Konvektiivse soojusvahetuse uurimise meetoodika.....	17
2.2. Katseseadme arendus	18
2.3. Katseseadme eelarvutus.....	18
2.4. Katseseadme kirjeldus.....	20
2.5. Katsete sooritamisel kasutatud mõõteseadmed.....	22
2.5.1. Toiteplokk <i>RND 320-KA3005P</i>	22
2.5.2. Andmehõivesead <i>Agilent 34972A</i>	23
2.5.3. Multimeeter <i>TENMA 72-10395</i>	24
3. KATSED	25
3.1. Katsete planeerimine	25
3.1.1. Temperatuuri mõõtmise kontrollimine	25
3.1.2. Temperatuuri kontrollmõõtmise mõõtemääramatus.....	26
3.1.3. Katseseadme testimine	27
3.1.4. Katseplaan.....	30
3.2. Katsete tulemused	30
3.3. Vabakonveksiooni soojusülekanaliteguri arvutamine	33
3.4. Vabakonveksiooni võrrandi leidmine katseandmete põhjal	36
KOKKUVÕTE	39
KASUTATUD KIRJANDUS.....	40
LISAD	42

TÄHISTE LOETELU

A – katsekeha pindala m^2 ;

a – temperatuurijuhtivustegur $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

D – katsekeha läbimõõt m

d – traadi läbimõõt mm

Gr – Grashofi arv

H – katsekeha pikkus m

L – keha iseloomustav suurus gravitatsioonivälja vektori suunas m ;

l – traadi pikkus m

Nu – Nusselti arv

Pr – Prandtl'i arv

Q_α – konvektiivne soojusvool W ;

Q_λ – juhtivuslik soojusvool W ;

Q_ε – kiirguslik soojusvool W

Ra – Rayleigh'iarv

T – absoluutne temperatuur K .

t – temperatuur $^\circ\text{C}$

Δt – temperatuurivahe K või $^\circ\text{C}$;

α – soojusülekandevastegur $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;

β – soojuskandja mahtpaisumistegur K^{-1}

ε – kiirgustegur

λ – aine soojusjuhtivustegur $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

ρ – aine tihedus $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

ρ' – eritakistus $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$.

τ – aeg s

SISSEJUHATUS

Igapäevases elus kasutavad inimesed pidevalt soojuslevi protsesse. Soojusvahetuse abil tagatakse elu komfortsed tingimused: valmistatakse söök, pikendatakse toitu säilivusaega, soojendatakse või jahutatakse eluruume.

Soojusülekande teoorias, mis on üks füüsika põhiharusid, on üksikasjalikult uuritud soojusenergia muundamise meetodeid. Kuid soojuslevi jääb siiski üheks olulisemaks teadusharuks paljudes uutes tehnoloogiates, näiteks biotehnoloogiad meditsiinis ja farmakoloogias, infotehnoloogias, alternatiivsetest energiaallikatest toodetud energia tootmises jne. Energiaressursside kasutamise tõhususe suurendamine, sealhulgas soojuskadude vähendamine, on oluline teema nii majanduslikus kui ka keskkonnavaldkes mõttes.

Füüsikaliste protsesside praktiline uurimine on oluline soojusülekande põhiprintsiipide ja seoste mõistmiseks. Vaba konveksiooni uurimise idee tekkis autoril soojusõpetuse kursuse raames ülesannete lahendamisel ja laboratoorse töö tegemisel. Tähelepanu köitis asjaolu, et ülesande: "boileri soojusvoo võrdlemine horisontaalses ja vertikaalses asendis" lahendamisel vastas tulemus teooriale, vertikaalses asendis on aga konveksiooniprotsess intensiivsem. Kevadsemestril 2020. aastal oli osa laboratoorseid töid võimalik iseseisvalt planeerida ja läbi viia kodus. Konveksiooni soojusvoolu arvutamiseks oli valitud 23 cm kõrgusega ja 52 mm läbimõõduga terassilinder. Samade teoreetiliste valemite kasutamisel oli tulemus vastupidine ehk konveksiooniprotsess oli intensiivsem rõhtasendis, mis ei vasta teooriale.

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks on valmistada katseseade ning uurida ja võrrelda konvektiivset soojuse eraldumist horisontaalses ja vertikaalses asendis ning teha järeldusi, kuidas see on vastavuses teooriaga.

Autor tänab oma juhendajaid Mart Hovi ja Külli Hovi abi ning nõuannete eest.

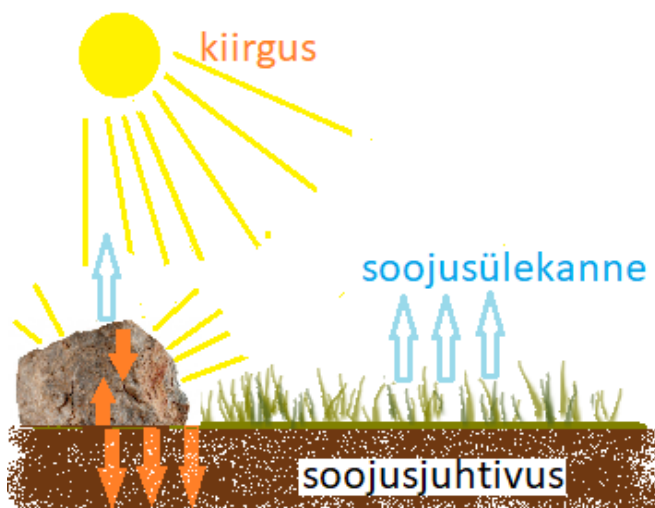
1. SOOJUSLEVI

1.1. Soojuslevi viisid

Soojuslevi on aja jooksul toimuv protsess, mille käigus soojusenergia kandub ühelt kehalt teisele. Eristatakse kolm soojuslevi vormi:

- konduktiivne, ehk soojusjuhtivus;
- konvektiivne, ehk soojusülekanne;
- kiirguslik.

Looduses toimuvad need protsessid sageli koos ja samaaegselt (joonis 1.1). Soojusjuhtivuse nähtus seisneb aineosakeste kineetilise energia ülekandmises keha kõrgema temperatuuriga aladelt madalama temperatuuriga aladele või kuumemalt kehalt jahedamale kehale. Konvektiivne soojusülekanne toimub aine, vedeliku või gaasi massiülekande tõttu gravitatsiooniväljas. Konveksiooniga kaasneb alati soojusjuhtivus. Juhtiva ja konvektiivse soojusülekande protsessides toimub ka kiirguslik soojuslevi, kuna kõik kehad, mille temperatuur ületab absoluutset nulli, kiirgavad elektromagnetlaineid. [1: 541-544]



Joonis 1.1. Looduses toimub soojusvahetus samaaegselt mitmel viisil.

Seega on konvektiivse soojusülekande uurimisel oluline arvestada ka teiste protsessis osalevate soojusülekandemeetoditega ning minimiseerida nende mõju.

1.2. Kiirguslik soojuslevi

Kiirgus on aine elementaarosakeste elektromagnetlainete (või footonite) kujul kiiratud energia. Elektromagnetkiirgusel on lai lainepikkuste spekter: 10^{10} kuni 10^{-10} μm . Soojuskiirgus hõlmab infrapunasppektrit, nähtavat valgust ja osa ultraviolettkiirguse spektrist lainepikkusega 10^{-1} μm kuni 10^2 μm . [1: 688]

Kiirguse maksimaalne intensiivsus keha pinnalt määratakse Stefan-Boltzmanni seadusega nagu:

$$Q_{\varepsilon \max} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (1.1)$$

kus $Q_{\varepsilon \max}$ on maksimaalne kiirgusega eralduv soojusvool W;

σ – Stefan-Boltzmanni konstant, $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;

A – keha pindala m^2 ;

T – keha absoluutne temperatuur K.

Suurima võimsusega kiiravat idealiseeritud pinda nimetatakse absoluutselt mustaks kehaks. Tegelik pinna soojuskiirgus sõltub kiirgustegurist:

$$Q_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (1.2)$$

Kus Q_{ε} on keha kiirguslik soojusvool W;

ε – kiirgustegur, mille väärtus jääb vahemikku 0 kuni 1.

Kiirgustegur on keeruline funktsioon, mis sõltub aine olemusest, temperatuurist ja pinna omadustest ning määratakse katseliselt. [2: 28]

Lisaks soojuslainete kiirgamise võimele on kehal võime soojuskiirgust neelata. Kiirguse neelamine toimub mitme mikroni paksusega pinnakihi. Kiirguslik soojusülekanne on vahe kiirgamis- ja neeldumisiintensiivsuse vahel. Kui kirjeldatud kiirgusteguri, pindala ja temperatuuriga pind on täielikult ümbritsetud palju suurema pinnaga, mille temperatuur on erinev ning nad on omavahel eraldatud gaasiga (õhuga), mis ei mõjuta kiirgust, siis valemi (1.2) põhjal kiirguse intensiivsus nende pindade vahel on:

$$Q_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.3)$$

kus T_1 - uuritava keha temperatuur K;

T_2 - ümbritseva pinna temperatuur K.

Sellisel juhul kiirguslik soojuslevi ei sõltu ümbritseva pinna kiirgustegurist ja selle pindala suurusest. [2: 28]

1.3. Konduktiivne soojuslevi

Soojusjuhtivus on aatomite ja molekulide kineetilise energia ülekanne, mis toimub siis, kui kehade või kehaosade vahel on temperatuurierinevus. Soojusjuhtivuse intensiivsus sõltub keha geomeetriast, kihi paksusest ja materjalist ning samuti temperatuuride erinevuse suurusel. Juhtivuslik soojusvoog on vektorsuurus ning on suunatud isotermilise pinna normaali suunas. [2: 18; 3: 10]

Soojushulka, mis läbib pinnaühikut ajaühiku jooksul, kirjeldab Fourier' seadus valemiga:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dA \cdot d\tau \quad (1.4)$$

kus λ – aine soojusjuhtivustegur $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;

$\frac{\partial t}{\partial n}$ = grad t – temperatuurigradiend $K \cdot m^{-1}$;

dA – pinnaelement m^2 ;

$d\tau$ – ajaühik s.

Soojusjuhtivustegur on materjali soojusjuhtivuse mõõt, arvuliselt võrdne soojushulgaga, mis läbib isotermilise pinnaühikut ajaühikus, temperatuurigradiendi ühiku kohta. Kuna teoreetiline arvutus on aga keeruline, kasutatakse praktikas eksperimentaalselt saadud andmeid. [1: 546; 3: 10]

Lähtudes energia jäävuse seadusest ja võttes arvesse soojusjuhtivuse Fourieri võrrandit (1.4), tuletati soojusjuhtivuse võrrand, mis võtab arvesse kolmemõõtmelises ruumis soojusülekande suunda ja keha füüsikalisi omadusi. Soojusjuhtivuse võrrand üldkujul on:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (1.5)$$

kus a – keha temperatuurijuhtivustegur, $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

c – keha erisoojus $J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}$;

ρ – keha tihedus $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

∇^2 - Laplace'i operaator $\nabla^2 = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$. [1: 550]

Soojusjuhtivuse võrrandil on määramatu hulk lahendeid ning konkreetse lahendi leidmiseks tuleb rakendada üldistavaid lisatingimusi. Need on sarnasustingimused:

- geomeetrilised – kuju ja mõõtmed;

- füüsikalised – erisoojus, tihedus, soojusjuhtivusregur, ning ka sisemise soojusallika võimsus ja asukoht, selle olemasolu korral;
- algustingimused – temperatuurijaotus kehas protsessi algushetkel, juhul kui protsess ei ole statsionaarne, $t = t(x, y, z)$, kui $\tau = 0$; erandjuhul $t = t_0 = \text{const}$
- ääritingimused – keha ja keskkonna koosmõju iseloomustus. Ääritingimusi on 4 liiki:
 - 1) temperatuurijaotus kehapinnal igal hetkel, $t_s = t(x, y, z, \tau)$, erandjuhul $t_s = \text{const}$;
 - 2) soojusvoo suurus ja kulgemine ajas igas pinnapunktis, $q_s = q(x, y, z, \tau)$, erandjuhul $q_s = \text{const}$;
 - 3) soojusvahetuse olemus keha pinna ja ümbritseva keskkonna vahel, kaasaarvatud juhtum, kui soojusülekanne toimub konvektiivselt;
 - 4) soojusvahetus toimub soojusjuhtivuse teel, mis eeldab ideaalseid kontakte kokkupuutuvate pindade vahel. [1: 550-552]

Soojusvool läbi ühekihilise seina Fourier' seaduse järgi avaldub valemiga:

$$Q_\lambda = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{s1} - t_{s2}) \cdot A \quad (1.6)$$

kus Q_λ on juhtivuslik soojusvool W;

λ – aine soojusjuhtivustegur $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

δ – seina paksus m;

A – seina pindala m^2 ;

$t_{s1} - t_{s2}$ – seina välispindade temperatuuride vahe K. [1: 554]

Seina välispindade temperatuuri võib väljendada nii Celsiuse kui ka Kelvini kraadides, kuna väärtuste lahutamise korral pole see oluline.

Soojusvoog silindrilises seinas pikkusühiku kohta on:

$$q'_\lambda = \frac{2\pi\lambda(t_{s1}-t_{s2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1.7)$$

kus t_{s1} – silindri seina sisemine temperatuur $^\circ\text{C}$;

t_{s2} – silindri seina välimine temperatuur $^\circ\text{C}$;

r_1 – silindri siseraadius m;

r_2 – silindri välisraadius m.

Ning siis temperatuur punktis P, mis asub ringil raadiusega r , ühekihilises silindris, määratakse valemiga:

$$t_{rP} = t_{s1} - \frac{q'_\lambda}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{r_P}{r_1} \quad (1.8)$$

kus t_{r_P} on temperatuur punktis P raadiusega r °C;

t_{s1} – silindri sisemise seina temperatuur °C;

q'_λ – soojusvoog silindrilises seinas pikkusühiku kohta $W \cdot m^{-1}$;

r_1 – silindri sisemine raadius m;

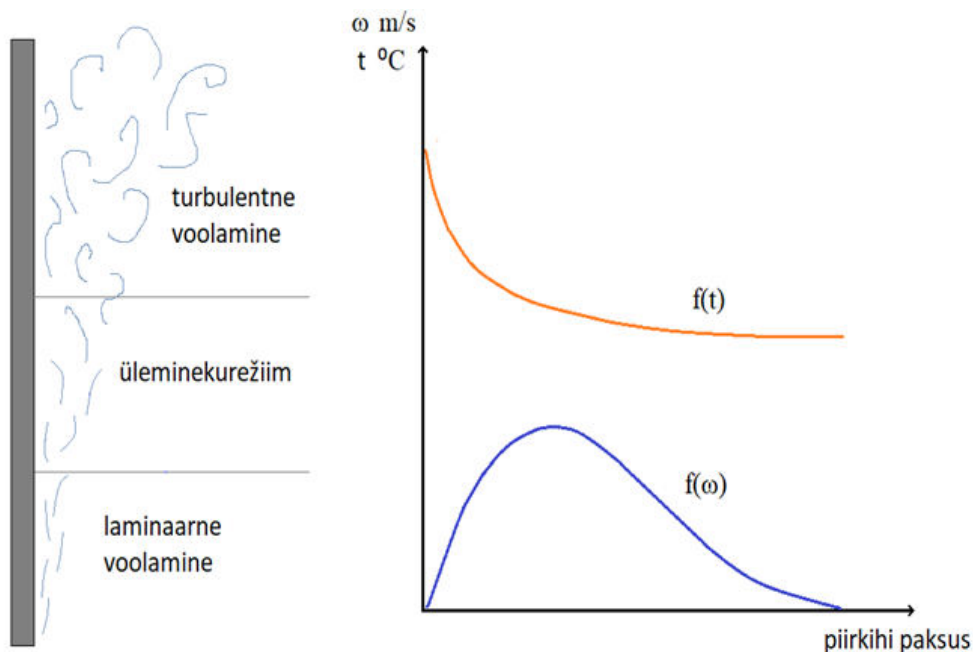
r_P – punkti P raadius m. [1: 561]

1.4. Konvektiivne soojuslevi

1.4.1. Konveksiooni olemus ja põhiprobleem

Konveksioon on vedeliku või gaasi liikumise ajal soojusülekanne protsess. Soojuskandja liikumise intensiivsuse järgi eristatakse laminaarseid, turbulentseid ja ülemineku režiime. Konveksioon esineb piirikihis ja koosneb kahest protsessist:

- 1) juhuslikust molekulaarsest liikumisest tingitud soojusjuhtivus - moodustub termiline piirikiht, kus temperatuur muutub funktsiooni $f(t)$ järgi;
- 2) energia ülekandmine makroskoopilise liikumise teel - moodustub hüdrodünaamiline piirikiht, kus voolamiskiirus muutub funktsiooni $f(\omega)$ järgi. (joonis 1.2)



Joonis 1.2. Soojusülekanne voolamise režiimid ning soojuskandja voolamiskiiruse $f(\omega)$ ja temperatuuri $f(t)$ sõltuvus piirikihi paksusest.

Seega soojusvoog konvektiivse soojusülekanne korral ajaühikus läbi pindalaühiku on:

$$q_{\alpha} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} + \rho \omega h \quad (1.9)$$

kus q_{α} on konvektiivne soojusvoog $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$;

λ – soojuskandja soojusjuhtivuse tegur $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

$\frac{\partial t}{\partial n}$ – temperatuurigradient $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$;

ω – soojuskandja voolamiskiirus $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

ρ – keskkonna tihedus $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

h – entalpia, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$. [1: 599, 3: 125]

Vaba konveksiooni korral on makroskoopiline liikumine põhjustatud soojuskandja temperatuuri muutusest tingitud tiheduse muutumisest. Gravitatsiooni mõjul soojem soojuskandja tõuseb ja jahedam langeb. [1: 650]

Newton-Richmanni seaduse järgi soojusvool on proportsionaalne soojusülekanne pinna (A), kehapinna (t_1) ja soojuskandja (t_2) temperatuuride erinevusega:

$$Q_{\alpha} = \alpha (t_1 - t_2) \cdot A \quad (1.10)$$

kus proportsiooni tegur α on konveksiooni soojusülekanne tegur, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Konvektiivse soojusülekanne arvutamisel on peamine ülesanne määrata konvektsiooni soojusülekanne tegur α , mis on suure hulga muutujate funktsioon. [3: 126]

1.4.2. Konveksiooni soojusülekanne tegur

Konveksiooni soojusülekanne tegur sõltub keha kujust ja suurusest, raskuskiirendusest, soojuskandja liikumise viisist, selle kiirusest ja füüsikalistest parameetritest nagu tihedus, erisoojus, soojusjuhtivus, mahupaisumine, viskoossus. Füüsikalised parameetrid sõltuvad omakorda temperatuurist ja muutuvad koordinaattelgedel x , y , z . Antud sõltuvust kirjeldab diferentsiaalvõrrandite süsteem:

energia võrrand – kirjeldab temperatuurivälja muutust liikuvast keskkonnast.

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (1.11)$$

liikumise võrrand – kirjeldab voolamisintensivsuse muutust ajas ja ruumis.

$$\frac{d\vec{\omega}}{d\tau} = -\vec{g}\beta\Delta t - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{\omega} \quad (1.12)$$

järjepidevusevõrrand – kirjeldab aine massiülekannet ruumis ja ajas.

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0 \quad (1.13)$$

Konvektiivvoo leidmiseks diferentsiaalvõrrandite süsteemi kaudu on vaja arvestada ka sarnasustingimustega, mis hõlmavad geomeetrilisi, füüsikalisi, ajalisi ja piiritingimusi. See muudab analüütilise lahenduse üsna keeruliseks ja seetõttu kasutatakse praktikas sarnasuse teooriat, mis lähtudes füüsikaliste nähtuste sarnasusest, võimaldab muutujate arvu oluliselt vähendada. [3: 126-138]

1.4.3. Sarnasuse teooria ja sarnasusarvud

Sarnasuse teooria võimaldab kujutada kompleksset süsteemi diferentsiaal-füüsikalistest suurustest koosnevate mõõtmeteta komplekside vaheliste sõltuvuste kujul. Sarnasuse teooria põhineb kolmel teoreemil.

Esimene teoreem: sarnaste nähtuste puhul on samanimelised sarnasuse kriteeriumid võrdsed ja sarnasuse näitajad võrdsed ühega.

Teine teoreem: diferentsiaalvõrrandite süsteemi lahendit saab esitada sarnasuse kriteeriumide funktsioonina.

Kolmas teoreem: süsteemide sarnasuse vajalik ja piisav tingimus on samade määravate kriteeriumide üheselt mõistetavuse ja võrdsuse tingimuste sarnasus. [4]

Konveksiooni protsesse kirjeldatakse sarnasusarvudega. Vaba konveksiooni puhul kõige sagedamini kasutatakse Nu , Gr , Pr ja Ra , mis on vastavalt Nusselti, Grashofi, Prandtl'i ja Rayleigh'i arvud.

Nusselti arv – soojusülekande käigus ülekantud soojusvoo tiheduse suhe soojusjuhtivuse tõttu paksuse L kihti läbinud soojusvoo tiheduse väärtusesse:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (1.14)$$

kus α – soojusülekandetegur $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$;

L – keha iseloomustav suurus gravitatsioonivälja vektori suunas m ;

λ – ümbritseva keskkonna soojusjuhtivustegur $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. [5: 82]

Sarnase nähtuste puhul peaksid Nusselti kriteeriumid olema võrdsed. Nusselti kriteerium on kahe teise mõõtmeteta kriteeriumi funktsioon: $Nu = f(Gr, Pr)$

Grashofi arv – iseloomustab soojuskandja vaba liikumise intensiivsust. Väljendatakse soojuspaisumisest tuleneva tõste- ja viskoosse hõõrdejõu suhtena:

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2} \quad (1.15)$$

kus g – raskuskiirendus, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;

L – keha iseloomustav suurus gravitatsioonivälja vektori suunas m ;

β – soojuskandja mahtpaisumistegur K^{-1} ;

Δt – pinna ja pinna ümbritseva keskkonna temperatuurivahe K ;

ν – soojuskandja kinemaatiline viskoossus $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Soojuskandja mahtpaisumistegur on pöördvõrdeline piirikihi temperatuuriga: $\beta = 1/T_{pk}$, kus piirikihi temperatuur $T_{pk} = 0,5 \cdot (t_k - t_0) + 273,15$ on keha ja ümbritseva keskkonna keskmine temperatuur Kelvini kraadides. [5: 82]

Prandtl'i arv – iseloomustab voolava keskkonna omaduste mõju soojusülekanne intensiivsusele:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (1.16)$$

kus ν on soojuskandja kinemaatiline viskoossus $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

a – temperatuurijuhtivustegur $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. [5: 82]

Rayleigh'i arv – on Grashofi ja Prandtl'i arvude korrutis, kasutatakse voolamise režiimi määramiseks.

$Ra < 10^9$ iseloomustab laminaarset voolamist.

$10^9 < Ra < 6 \cdot 10^{10}$ iseloomustab üleminekurežiimi, kus piirikihis esinevad nii laminaarne kui ka turbulentne voolamine.

$Ra > 6 \cdot 10^{10}$ iseloomustab turbulentset voolamist. [1: 656]

Uuemate uuringute kohaselt soovitatakse laminaarset režiimi sõnastada Grashofi kriteeriumi kaudu, ehk $Gr < 10^9$ iseloomustab laminaarset voolamist [6: 203].

Seos sarnasusarvude vahel on tavaliselt määratletud astmefunktsiooni kujul. Vaba konvektsiooni puhul:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \text{ või } Nu = C(Ra)^n \quad (1.17)$$

kus C ja n on konstandid, mida võib määrata eksperimentaalselt või analüütiliselt. [4]

1.4.4. Vabakonvektsiooni võrrand.

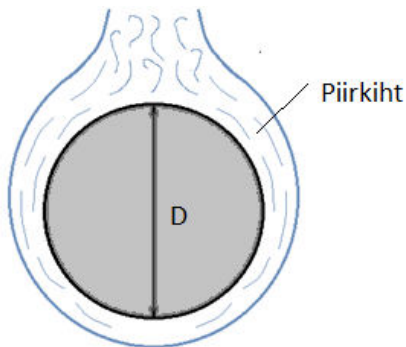
Sõltuvalt ümbritseva keskkonna omadustest, voolurežiimidest, keha kujust, suurusest ja asendist võivad konstandid C ja n erineda. Näiteks laminaarse voolamise puhul, kui Rayleigh'i arv on vahemikus 10^4 kuni 10^7 ning horisontaalsel plaadil õhus toimub konvektsioon, on võrrand järgmisel kujul [2: 542, 6: 208, 7: 67]:

$$Nu = 0,54(Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (1.18)$$

Vertikaalsel pinnal nii laminaarse kui ka ülemineku- ja turbulentse režiimi jaoks, kui Rayleigh'i arv on vahemikus 10^{-1} kuni 10^{12} , kasutatakse laialdaselt Churchilli ja Chu valemit [2: 542, 6: 204, 7: 67]:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (1.19)$$

Vabakonvektsioon horisontaalse silindri ümber sarnaneb soojusvooluga mööda vertikaalset pinda. Sellisel juhul võetakse silindri läbimõõt D iseloomulikuks vertikaalseks suuruseks (joonis 1.3).



Joonis 1.3. Vabakonvektsioon ümber horisontaalse silindri.

Seetõttu arvutatakse soojusülekanne nagu vertikaalse seina korral. Churchill ja Chu valem sellisel juhul on [2: 542-544, 6: 203-209, 7: 67]:

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (1.20)$$

Antud valemit (1.20) võib kasutada kui Rayleigh'i arvu väärtus on vahemikus 10^{-5} kuni 10^{12} ja kõigi Prandtl'i arvude puhul. [6: 209]

Vabakonveksioon vertikaalse silindri ümber sõltub silindri kõrguse ja läbimõõdu suhtest. Suure läbimõõduga vertikaalse silindri konveksioonprotsessi saab arvutada vertikaalse seina võrrandit kasutades. Selleks on vaja, et oleks rahuldatud järgnev tingimus:

$$\frac{D}{H} > 35 \cdot Gr^{-0,25} \quad (1.21)$$

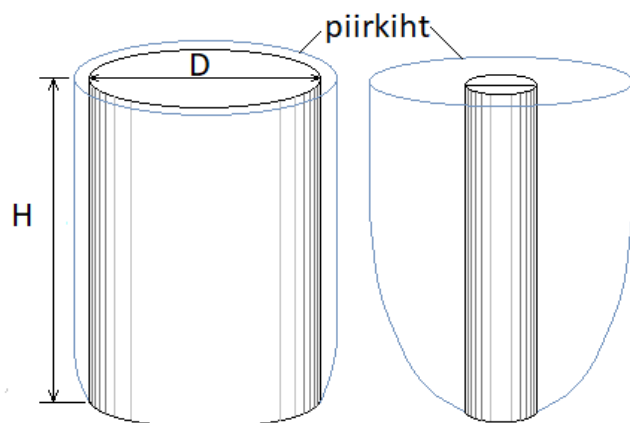
kus H on silindri kõrgus m;

D – silindri läbimõõt m.

Sellisel juhul kumeruse mõju ei ole oluline. [2: 543, 7: 67]

Kui konveksioon toimub kõrge ning väikese läbimõõduga silindri ümber, on piirikihi paksus suurem kui silindri läbimõõt (joonis 1.4). Sel juhul, võttes arvesse seina kõveruse efekti, on vabakonveksiooni võrrand laminaarse režiimi jaoks [3: 210]:

$$Nu = \frac{3}{4} \left[\frac{7 \cdot Ra \cdot Pr}{15 \cdot (20 + 21 \cdot Pr)} \right]^{1/4} + \frac{4 \cdot (272 + 315 \cdot Pr) \cdot H}{35 \cdot (64 + 63 \cdot Pr) \cdot D} \quad (1.22)$$



Joonis 1.4. Vabakonveksioon erineva läbimõõduga vertikaalsete silindrite ümber.

Antud valemid tuletavad Nusselti arvu empiirilise korrelatsiooni. Churchill ja Chu valemi täpsus on kuni umbes $\pm 30\%$ [7: 67].

2. KATSESEADE

2.1. Konvektiivse soojusvahetuse uurimise metoodika

Kuna soojusülekanne protsesse kirjeldavad keerukad funktsioonid mitme argumendiga, praktiline uurimine on oluline. Praktilise eksperimendi eesmärk on simuleerida reaalsel olukorda, määrata soojusülekanne teguri väärtus ja leida seda tüüpi mudeli puhul kriteeriaalne sõltuvus. Oluline faktor, mis mõjutab vabakonveksiooni soojusülekanne protsessi, on soojusvahetuspinna suund gravitatsioonivälja vektori suhtes. [8]

Kui keha soojendamiseks kasutatakse elektrienergiat, siis soojusvoolu võimsus võrdub küttekeha elektrilise võimsusega:

$$Q = P = I \cdot \Delta U \quad (2.1)$$

kus Q on soojusvõimsus W;

P – elektriline võimsus W;

I – kütteelementi läbiv voolutugevus A;

ΔU – pingelang kütteelemendil V. [4, 8]

Kehapinna ja ümbritseva keskkonna temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse termoelektrilisi andureid – termopaare.

Uuritava objektiga tehakse katseid erineva võimsusega. Teades soojusvoolu Q W, konveksiooni pindala A m² ja keha pinna alg- ja maksimaalset temperatuuri Δt K, leitakse Newton-Richmanni valemi abil (1.10) soojusülekanne tegur igale katsele:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t \cdot A}, \quad (2.2)$$

Seejärel arvutatakse välja sarnasuse arvud: Nusselti Nu , Grashofi Gr ja Prandtl'i Pr , ning leitakse sõltuvus $Nu = C(Gr \cdot Pr)^n$, mis logaritmilisel kujul on lineaarne funktsioon:

$$\ln Nu = \ln C + n \cdot \ln(Gr \cdot Pr)$$

kus $\ln C$ on punkt, kus joon lõikub vertikaalteljega;

n – on sirge ja horisontaaltelje vahelise kaldenurga tangens.

2.2. Katseseadme arendus

Katse sooritamiseks on vajalik katsekeha, mis vastab järgmistele nõutele:

- on võimalik soojendada ja jahutada tubastel tingimustel nii horisontaalses kui ka vertikaalses asendis;
- pinna temperatuuri on võimalik mõõta protsessi käigus pidevalt;
- on välistatud ümbritseva keskkonna õhu turbulentne liikumine katse ajal;
- on minimeeritud kiirgusliku soojuslevi mõju;
- katsekeha peab olema võimalikul odav ja kergesti valmistatav.

Katsekeha võib soojendada kolmel viisil: konvektiivselt, soojusjuhtivuse või kiirguse teel. Ettevalmistamise käigus hinnati mitut erinevat varianti (lisa 1). Nõuetele vastavust analüüsides valiti variant: metallsilindri soojendamine vasktraadist kütteelemendi abil.

2.3. Katseseadme eelarvutus

Katsekeha valmistamiseks valitud: kereks – alumiiniumist toru, täitmiseks – liiv, kütteelemendiks – vasktraat, isoleerimiseks – vilgukivi lehed. On vaja välja arvutada kui pikk peab olema kütetraat, valmistada katsesilinder ning kontrollida arvutused.

Antud:

vasktraati läbimõõt $d_{Cu} = 0,3 \text{ mm}$;

alumiiniumtoru välimine raadius $r_v = 8 \text{ mm} = 0,008 \text{ m}$;

alumiiniumtoru sisemine raadius $r_s = 7 \text{ mm} = 0,007 \text{ m}$.

Kasutatud ainete füüsikalised parameetrid [5: 31-42]:

liiva tihedus $\rho_{liiv} \approx 1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

liiva masserisoojus $c_{liiv} \approx 800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

alumiiniumi tihedus $\rho_{Al} \approx 2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

alumiiniumi masserisoojus $c_{Al} \approx 900 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

vase eritakistus $\rho'_{Cu} = 0,0171 \text{ }\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$.

Toru pikkuseks on valitud 12 cm ($H = 0,12\text{m}$), mis võimaldab kütteelementi kergelt sinna sisse paigutada.

On tarvis leida soojushulk, mis tuleb edastada kehale selleks, et soojendada seda algtemperatuurist lõpptemperatuurini:

$$E = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (2.3)$$

Kus E on soojendamiseks kuluv energia J;

m – soojendatava keha mass kg;

Δt – temperatuuri muutus K;

c – ainemasseriisoojus $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [9]

Eeldades, et katsekeha tuleb soojendada 20 kraadi võrra, energiahulk, mis vaja edastada on:

$$E = m_{\text{liiv}} \cdot c_{\text{liiv}} \cdot \Delta t + m_{\text{Al}} \cdot c_{\text{Al}} \cdot \Delta t \quad (2.3.1)$$

Liiva ja alumiiniumtoru massi saab määrata mahtu, $V \text{ m}^3$ ja tihedust, $\rho \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ teades.

$$m = V \cdot \rho \quad (2.4)$$

Liiva mass valemi (2.2) järgi:

$$m = \pi \cdot r_s^2 \cdot H \cdot \rho = \pi \cdot 0,007^2 \cdot 0,12 \cdot 1500 = 0,0277 \text{ kg}$$

Alumiiniumtoru mass valemi (2.2) järgi:

$$m = (\pi \cdot r_v^2 \cdot H - \pi \cdot r_s^2 \cdot H) \cdot \rho = (\pi \cdot 0,008^2 \cdot 0,12 - \pi \cdot 0,007^2 \cdot 0,12) \cdot 2700 = 0,0153 \text{ kg}$$

Siis energiahulk 20 kraadi võrra temperatuuri tõstmiseks valemi (2.1.1) järgi:

$$E = 0,0277 \cdot 800 \cdot 20 + 0,0153 \cdot 900 \cdot 20 = 718,6 \text{ J}$$

Füüsika kursusest on teada, et alalisvoolu puhul on tarbitud elektrienergia võimsuse ja aja korrutis. Soojusenergia on osa koguenergiast, mis läheb keha soojendamiseks ja sõltub kasutegurist.

$$E = P \cdot \tau \cdot \eta \quad (2.5)$$

Eeldades, et soojendamise aeg on 15 min ja kasutegur on 75%, toiteallika elektriline võimsus valemi (2.3) järgi on:

$$P = \frac{E}{\tau \cdot \eta} = \frac{718,6}{900 \cdot 0,75} = 1,065 \text{ W}$$

Selline võimsus saavutatakse, kui rakendada pinget 1 V voolutugevusega 1 A. Siis peab traadi takistus Ohmi seaduse järgi olema 1 Ω . Traadi elektriline takistus on leitav valemiga:

$$R = \frac{\rho' \cdot l_t}{S} \quad (2.6)$$

kus R on traadi elektriline takistus Ω ;

ρ' – aine elektriline eritakistus $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$;

l_t – traadi pikkus m;

S – traadi läbilõike pindala mm^2 .

Valemist (2.4) järgi võib leida ligikaudse vajaliku traadi pikkuse:

$$l_t = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{1 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,3^2}{0,0171} = 4,13 \text{ m}$$

Sellise pikkusega traadist katsesilindri jaoks kütteelementi valmistada on keeruline. Proovikatsekeha valmistamisel on välja selgitatud, et sobiv traadi pikkus on umbes 2 m, mis muudab takistust kaks korda väiksemaks, ehk $R \approx 0,5 \Omega$ ja voolutugevust kaks korda suuremaks, ehk $I \approx 2 \text{ A}$, sama pinge $U \approx 1 \text{ V}$ juures. Sel juhul muutub võimsus suuremaks $P \approx 2 \text{ W}$, mis vähendab soojendamiseaega.

Selleks, et oleks võimalik sooritada katsed pingega 5 V ning tagada pinge reguleerimise võimalust ja läbiviia katsed erinevate pinnatemperatuuride juures, on otsustatud valmistada viis võimalikult ühesugust katsesilindrit ja ühendada neid jadamsi. See annab võimaluse rakendada pingetkeskmiselt 5 V ja reguleerida vahemikus 3 V kuni 7 V, kusjuures voolutugevus jääb vahemikus 1,2 A kuni 2,8 A.

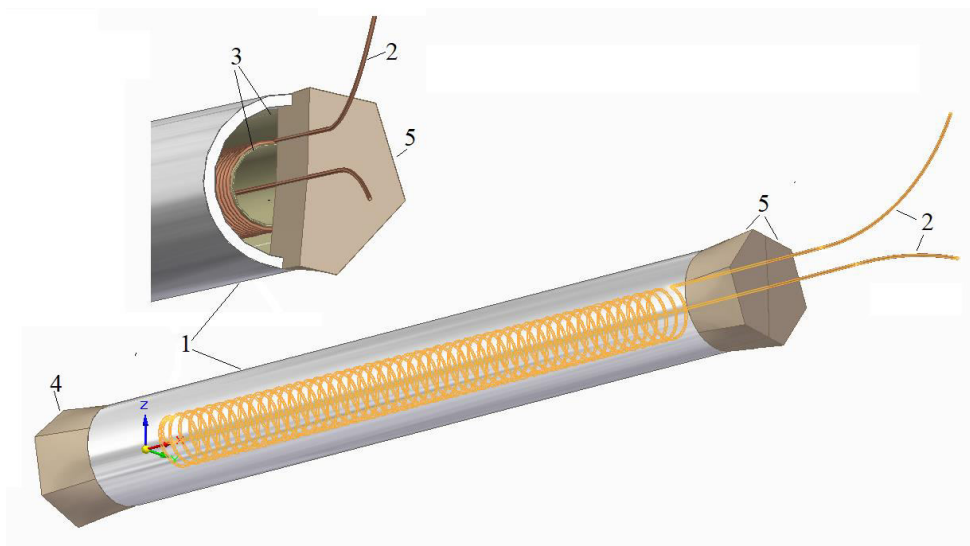
2.4. Katseseadme kirjeldus

Katseseade koosneb viiest jadamsi ühendatud silindrist. Silindrite valmistamiseks kasutati järgmisi materjale: liiv, vilgukivi lehed, vasktraat, alumiiniumtoru, kork (joonis 2.1).



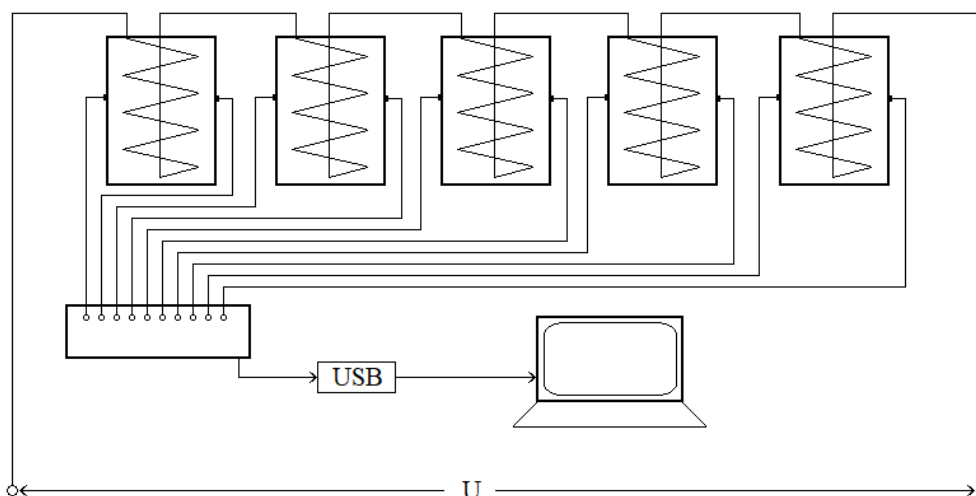
Joonis 2.1. Katsekeha valmistamiseks kasutatud materjalid.

Silindriks on läikiva pinnaga alumiiniumtoru. Toru sisepind on elektriliselt isoleeritud vilgukivi lehtedega. Vasktraat on keritud spiraalselt, kusjuures traadi üks ots kulgeb spiraali sees nii, et traadi mõlemad otsad on silindri samal küljel. Spiraali sees on ka vilgukivi lehtedest toru, mis isoleerib sees kulgeva traadi osa ja annab kütteelemendile vormi ja jäikuse. Kogu vaba ruum silindri sees on täidetud peeneteralise liivaga. Toru otsad on suletud korkmaterjalist pistikutega. Ülemises pistikus on sisselõige, mille kaudu on vasktraadi otsad väljatoodud. (joonis 2.2)



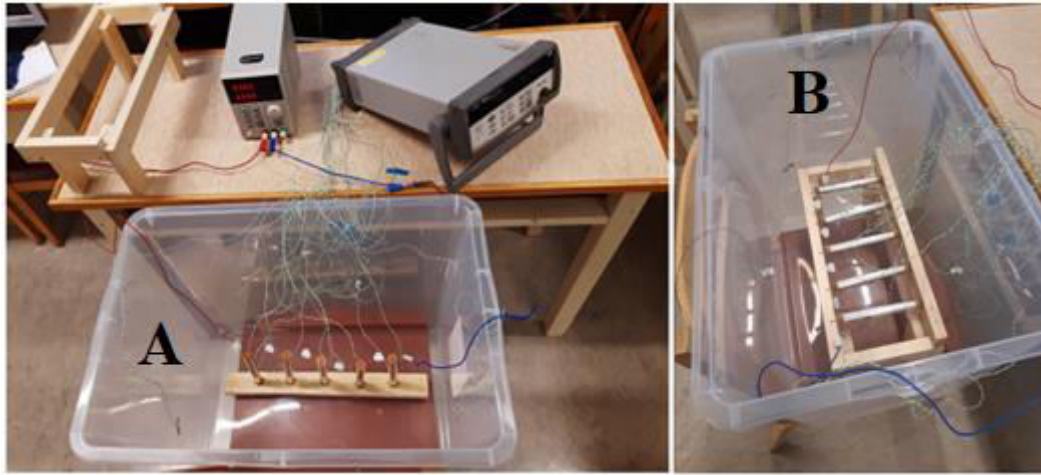
Joonis 2.2. Katsesilindri konstruktsioon. 1 – alumiiniumtoru, 2 – vasktraat, 3 –vilgukivist isolatsioonikiht, 4 – alumine korkpistik, 5 – ülemine, sisselõikega korkpistik.

Traadi otsad ühendatakse toiteallikaga, mille pingetsaab reguleerida (joonis 2.3). Katseseadme takistuseks mõõdeti $3,6 \Omega$.



Joonis 2.3. Katseseadme skeem.

Pinge rakendamisel tekib elektrivool, mis vasktraati läbides põhjustab selle soojenemist. Soojusjuhtivuse teel levib soojus silindri sees ja soojendatakse ka alumiiniumtoru pinda. Alumiiniumtoru pinnalt eraldub soojus väliskeskkonda konvektiivsuse ja kiirguslikul teel. Toru pinna temperatuur mõõdetakse termopaaride abil, igale silindrile kinnitati kaks termopaari. Termopaarid kinnitati kleepfooliumi abil, mille kiirgustegur on umbes sama nagu alumiiniumtorul.



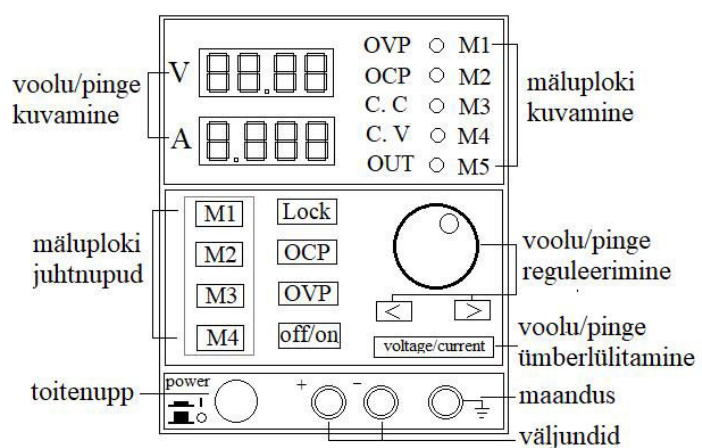
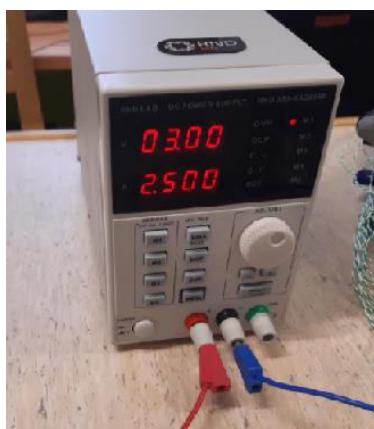
Joonis 2.4. Katseseadme vertikaalne (A) ja horisontaalne (B) asend eksperimeendi käigus.

Silindrid on alusele kinnitatud vertikaalselt. Aluse võib paigutada toele ja asetada horisontaalselt. Välismõjude poolt põhjustatud õhu liikumise piiramiseks on katseseade paigutatud plastkasti. Kasti seintele on kinnitatud veel viis termoandurit, mis mõõdavad ümbritseva keskkonna temperatuuri erinevates punktides. (joonis 2.4)

2.5. Katsete sooritamisel kasutatud mõõteseadmed

2.5.1. Toiteplokk *RND 320-KA3005P*

Toiteplokk kasutatakse katseseadme pingestamisel. Pinge ja voolutugevus on seadistatavad. Voolutugevus sõltub takistusest ning see on katse kestel reaajas jälgitav. (joonis 2.5)



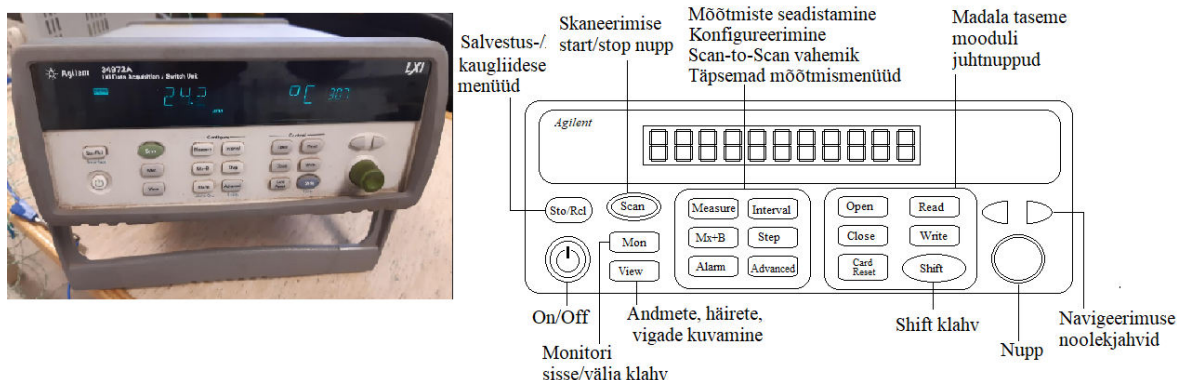
Joonis 2.5. Toiteplokk *RND 320-KA3005P*[10].

Maksimaalne väljundvõimsus on 150 W. Pinget on võimalik reguleerida vahemikus 0 kuni 30 V, voolutugevust 0 kuni 5 A. Seadme täpsus: pinge $\leq 0,5\% + 20 \text{ mV}$; vool $\leq 0,1\% + 10 \text{ mA}$. [10]

Katseseadme traadi otsad on ühendatud pluss- ja miinusklemmidega.

2.5.2. Andmehõiveseadet *Agilent 34972A*.

Temperatuuri mõõtmiseks kasutati andmehõiveseadet *Agilent 34972A* (joonis 2.6). Seadmega saab mõõta erinevaid parameetreid: temperatuuri, pinget, voolu, sagedust, takistust [11]. Konvektsiooni uurimiseks mõõdeti õhu- ja pinnatemperatuuri termoelektriliste andurite abil.



Joonis 2.6. Andmehõiveseadet *Agilent 34972A* [11].

Seade koosneb kolme pesaga baasaparaadist ja integreeritud digitaalsest multimeetrist. Kasutati K-tüüpi (kromell (Ni90Cr10) – alumell (Ni94Mn3Al2Si1)) termopaare. Termopaaride külmühendused on ühendatud mõõteseadmele, kuumühendused on kinnitatud silindripindadele või kasti seinale. Temperatuuri väärtused fikseeritakse intervaliga 30 sekundit. Kogutud andmed konverteeritakse tabelisse analüüsimiseks.

Seadme tootja poolt määratud termopaari mõõtmisviga temperatuuride vahemikus $-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $+1370 \text{ }^{\circ}\text{C}$ on $\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ – $2,2^{\circ}\text{C}$ [12].

2.5.3. Multimeeter *TENMA 72-10395*

Digitaalne taskumultimeeter *TENMA 72-10395* (joonis 2.7). Resolutsioon mõõtmispiirkonnas kuni $400\ \Omega$ on $0,1\ \Omega$ [13].



Joonis 2.7. Multimeeter *TENMA 72-1039*.

Multimeetrit kasutati katsesilindrite takistuse mõõtmiseks ja võrdlemiseks, et kontrollida silindrite takistuste võrdsust. Mõõtmistulemused jäid vahemikku $0,6 - 0,7\ \Omega$.

3. KATSED

3.1. Katsete planeerimine

3.1.1. Temperatuuri mõõtmise kontrollimine

Temperatuuri mõõtmiseks kasutati K-tüüpi termopaari 15 tk, mõõtepiirkond -184 kuni $+1260$ °C. Mõõtmiste täpsuse kontrollimiseks võeti aluseks kaks fikseeritud looduslikku temperatuuri: jää sulamistemperatuur $t_s = 0$ °C ja vee keemistemperatuur t_k , mis sõltub õhurõhust. Katse korraldamise päeval oli õhurõhk [14]: $p = 993,41$ mbar = $0,99431$ MPa. Sellel atmosfäärirõhul on vee keemistemperatuur on $t_k = 99,46$ °C [15: 62, tabelist tuletatud]. Jää sulamistemperatuuri mõõdeti vee ja jääkuubikutega täidetud termos. Vee keemistemperatuur mõõdeti anumal, aktiivses keemisfaasis. (tabel 3.1)

Tabel 3.1. Kontrollmõõtmiste tulemused

Termo- paari nr	Jää sulamine			Vee keemine				
	Kontroll tempe- ratuur, X_k , °C	Keskmine temperatuur, X_m , °C	ΔX , °C	Kontroll temperatuur, Y_k , °C	Keskmine temperatuur, Y_m , °C	$Y_m - Y_k$, °C	Parandus tegur, °C	ΔY , °C
1	0	0,27	0,27	99,46	98,63	-0,83	0,50	-0,33
2	0	0,11	0,11	99,46	98,65	-0,81	0,50	-0,31
3	0	-0,23	-0,23	99,46	99,45	-0,01	0,50	0,49
4	0	-0,10	-0,10	99,46	99,03	-0,43	0,50	0,07
5	0	-0,11	-0,11	99,46	99,10	-0,36	0,50	0,14
6	0	-0,06	-0,06	99,46	98,93	-0,53	0,50	-0,03
7	0	-0,18	-0,18	99,46	99,11	-0,35	0,50	0,15
8	0	-0,08	-0,08	99,46	99,33	-0,13	0,50	0,37
9	0	-0,24	-0,24	99,46	98,88	-0,58	0,50	-0,08
10	0	-0,19	-0,19	99,46	99,01	-0,45	0,50	0,05
11	0	-0,15	-0,15	99,46	98,90	-0,56	0,50	-0,06
12	0	-0,09	-0,09	99,46	99,23	-0,23	0,50	0,27
13	0	-0,17	-0,17	99,46	98,94	-0,52	0,50	-0,02
14	0	-0,17	-0,17	99,46	98,87	-0,59	0,50	-0,09
15	0	-0,18	-0,18	99,46	98,82	-0,64	0,50	-0,14
16	0	-0,29	-0,29	99,46	98,83	-0,63	0,50	-0,13
	ΔX keskmine		-0,12	ΔY keskmine		-0,48		0,02

Mõõdeti 5 minuti jooksul 30-sekundilise intervalliga. Iga anduriga registreeriti kümme näitajat (lisa 2). Mõõdetud keskmise keemistemperatuuri ja kontrolltemperatuuri erinevus on $\Delta Y = -0,48$ °C. Kusjuures temperatuuri muutuse vahemik on -0,01 kuni -0,83, nii et kõikide andurite keskmine mõõdetud temperatuur on kontrolltemperatuurist madalam. Kui võtta keskmise temperatuuri erinevus parandustegurina, siis $\Delta Y = 0,02$ °C. Jää mõõdetud keskmise sulamistemperatuuri ja kontrolltemperatuuri erinevus on $\Delta X = -0,12$ °C. Kuid mõõtmise ajal ei suudetud tagada vee pidevat ringlust sellisel viisil, et andurid ei kontakteeruks jääkuubikutega.

Tehtud katsete põhjal on võimatu täpselt öelda, kas parandustegurit on vaja kasutada kõigi mõõtmiste jaoks või ainult kõrgemate temperatuuride korral. Samuti on võimalik, et selle temperatuurierinevuse põhjustab aurukiht, mis tekib kütteelemendi ja keevavee vahele ning takistab soojusülekannet.

3.1.2. Temperatuuri kontrollmõõtmise mõõtemääramatus

Temperatuuri ühekordse mõõtmise väärtusena plaanitakse võtta katseseadme külge kinnitatud andurite lugemi keskmine väärtus. Mõõtmistulemuste usaldusväärsuse hindamiseks kasutatakse andurite testimisel keevas vees (lisa 2) saadud tulemusi. Kui kõigi anduritega tehtud mõõtmiste keskmine tulemus võtta üksikult, siis võib mõõteperioodi jooksul saadud keskmisi väärtuseid võtta üksikute mõõtmiste seeriana ning selle alusel leida temperatuuri mõõtmise mõõtemääramatus. (tabel 3.2)

Tabel 3.2. Andurite mõõtetulemuste statistiline analüüs

Katse nr	X_i	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
1	96,07	-3,24	
2	99,21	-0,096	0,009
3	99,36	0,054	0,003
4	99,28	-0,026	0,001
5	99,33	0,024	0,001
6	99,27	-0,036	0,001
7	99,37	0,064	0,004
8	99,38	0,074	0,006
9	99,38	0,074	0,006
10	99,17	-0,136	0,018
	$\bar{X} = 99,31$		$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 0,048$

Nagu on tabelist näha, esimese mõõtmise tulemus erineb oluliselt keskväärtusest, mis võib olla seotud sellega, et esimene näit oli fikseeritud enne kui andurid vette sukeldati. Seega antud katse tulemus eemaldatakse andmerekast.

Tabel arvutuse abil leitud mõõdiste aritmeetiline keskmine $\bar{X} = 99,31$, hälbe $X_i - \bar{X}$ ning hälvete ruutude summa $\sum (X_i - \bar{X})^2 = 0,048$

Mõõdiste dispersioon – iseloomustab üksikmõõtmise hajuvust keskväärtuse suhtes:

$$D(X) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (X_i - \bar{X})^2 = \frac{0,048}{8} = 0,006$$

Standardhälve – ruutjuur dispersioonist, väljendatakse samades ühikutes analüüsitud andmeseeriatega:

$$\delta = \sqrt{D(X)} = 0,077 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Mõõtemääramatus iseloomustab juhusliku vea tõttu tekkivat kahtlust mõõtetulemuse usaldusväärsuses. Võttes arvesse usaldusväärsuse tõenäosus $P = 95\%$, ning sellele vastava Studenti faktor $t = 2,37$ [15: 29, tabelist], mõõtemääramatus on:

$$U = \frac{\delta}{\sqrt{n}} \cdot t = \frac{0,076}{\sqrt{8}} \cdot 2,37 = \pm 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Suhteline mõõdiste mõõtemääramatus on:

$$\frac{U}{\bar{X}} \cdot 100 = \frac{0,06}{99,3} \cdot 100 = \pm 0,06\%$$

Seega mõõdetud vee keemistemperatuur $t_k = 99,31 \pm 0,06$, $P = 0,95$. [15]

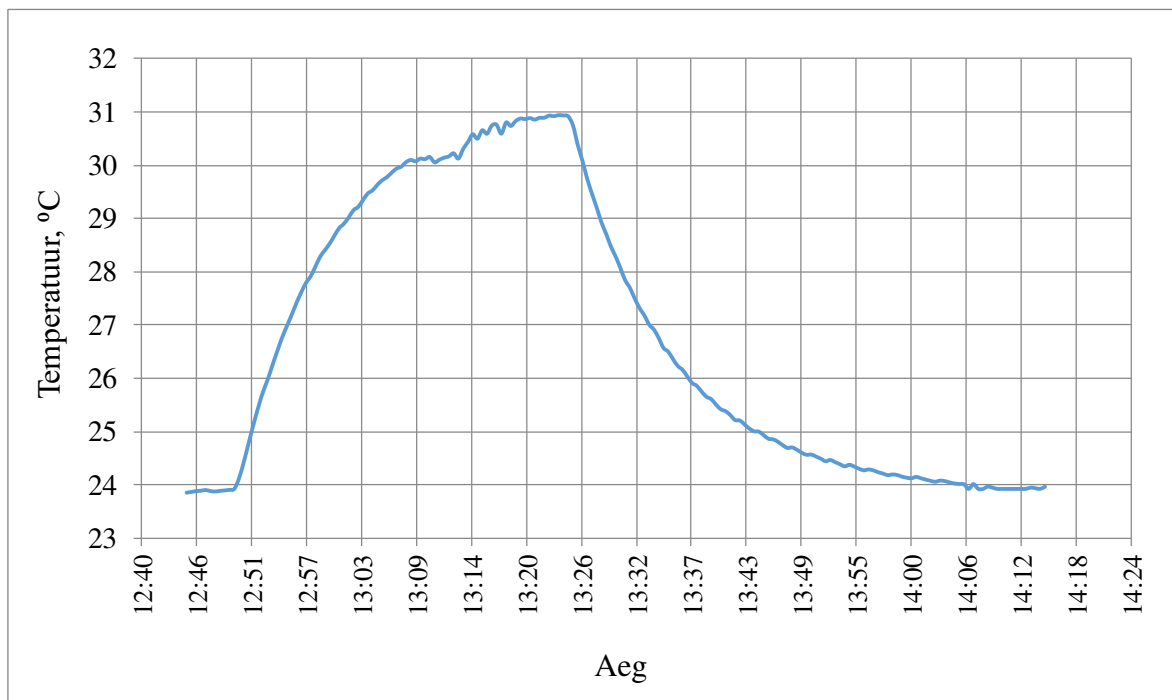
Mõõtemääramatus antud mõõteseade tootja poolt on $\pm 1,1^\circ\text{C} - 2,2^\circ\text{C}$ temperatuuri vahemikus $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$ kuni $+1370 \text{ } ^\circ\text{C}$, mis moodustab $\pm 0,08 - 1,1 \%$ antud mõõtevahemikust.

3.1.3. Katseseadme testimine

Katseseadme testimise eesmärgiks on saada andmed, mis aitavad katset kavandada, näiteks katseseadme töökorrasolek, soojendamise ning jahtumise tsüklite kestvus, temperatuuri tõus antud pingega jne.

Esimene katse viidi läbi pingega 3V, vertikaalses asendis. Soojendamisaeg oli 35 min, jahtumise aeg oli 50 min (joonis 3.1). Temperatuuri muutustjälgi visuaalset ühe suvaliselt valitud anduri järgi ning soojendamine kestis kuni temperatuur stabiliseerus, ehk kolme

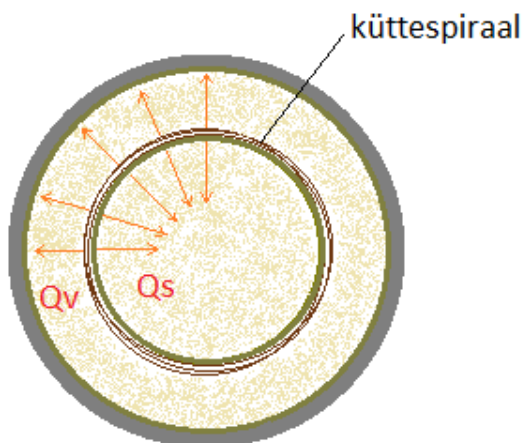
minuti jooksul anduri näit ei tõusnud. Katseseadme keskmine pinnatemperatuur katse alguses on 23,9 °C, lõpus on 31,0 °C. On näha, et stabiilne keskmise temperatuuri näit 31 °C juures kestab vähem kui kaks minutit, mis tähendab, et soojendamise aega võib pikendada, nii et ühe anduri stabiilne näit kestaks üle 5 minuti, siis saab täpsemalt määrata maksimaalse temperatuuri keskmist väärtust.



Joonis 3.1. Esimeses katses mõõdetud temperatuur soojenemisel ning jahtumisel.

Samuti temperatuuri 30 °C juures on näha, et temperatuuri tõus peatub ja on 2,5 minuti jooksul stabiilne ning seejärel hakkab uuesti kasvama ja tõuseb veel ühe kraadi võrra.

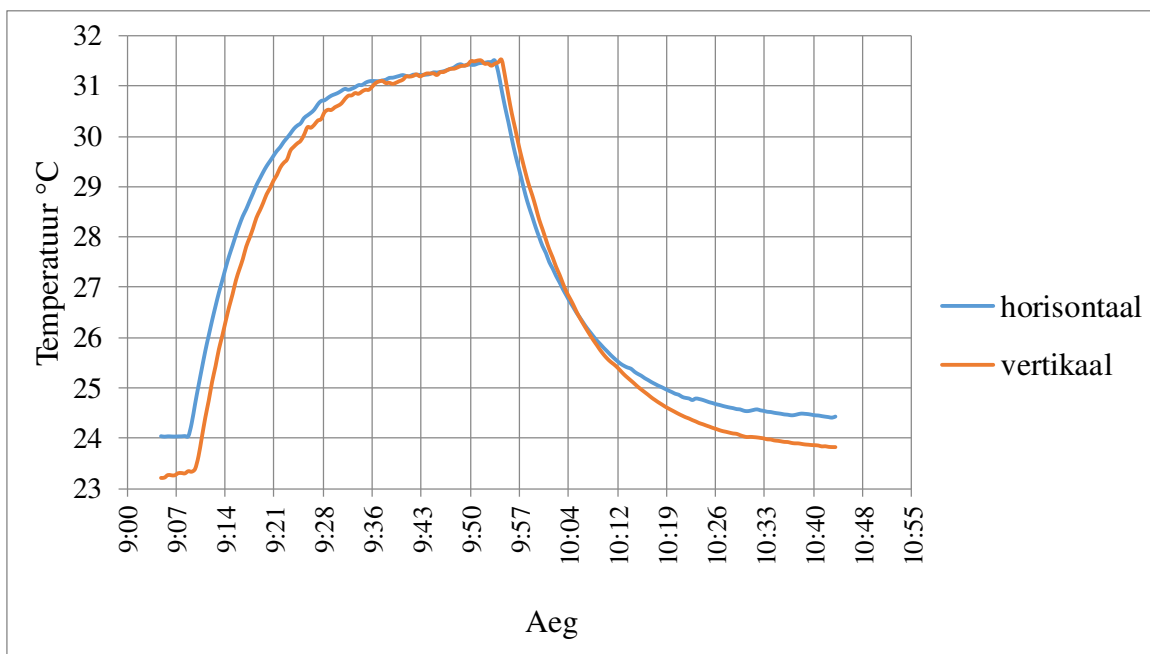
Selline eripära võib olla seotud katsekeha konstruktsiooniga. Tõepoolest, kodustes tingimustes ei ole võimalik valmistada katsekeha suure täpsusega. Käsitsi valmistatud küttespiraali keerdude tihedus ja spiraali paiknemine silindris kesktelje suhtes võib erineda nii erinevatel silindritel, kui ka ühe silindri ulatuses. See võib põhjustada temperatuuri vahet silindri erinevates pinnapunktides. Lisaks jagab küttespiraal silindri kaheks osaks (joonis 3,2) ning osa soojusvoost suunatud sissepoole Q_s , osa aga väljapoole Q_v .



Joonis 3.2. Soojusvoogude suund katsekeha soojendamisel.

See võib põhjustada silindri ruumi ebaühtlast soojenemist. Silindri südamiku maksimumtemperatuuri saavutamisel tekib temperatuuri kohalik maksimum. Seejärel soojusvoog väljaspoole suureneb ning uuesti hakkab kasvama ka pinna temperatuur. Seda võib märgata temperatuuri graafikul (joonis 3.1) ajavahemikus 13:09 kuni 13:16.

Teisel katsel ja kolmandal katsel on temperatuuri muutus märgatavalt sujuvam (joonis 3.3).



Joonis 3.3. Teise ja kolmanda katse temperatuuri muutus soojenemisel ning jahtumisel.

Sujuv temperatuuri muutmine tagab täpsema temperatuuri maksimumi ning seega ka soojendustsükli kestuse ja tarbitud energia määramise.

3.1.4. Katseplaan

Analüüsisides katseseadme testimise tulemusi järeldati:

- 1 – katsetamise tsükkel soojendamine-jahtumine võtab aega umbes 2 tundi. Esimesena otsustati sooritada eelkatse, mis ühtlustab katsekeha sisemise temperatuurining seejärel tehti katse horisontaal- ja vertikaalasendis. Seega kestab iga katseseeria 6 tundi. Asendi valikul tuleb jälgida, et katsete järjekord ja katseseadme asend ei oleks teineteisest sõltuvuses;
- 2 – otsustati teha 4 või 5 katsetsükli pingega 3 V, 4 V, 5 V, 6 V ning kui 6 V pingel korral temperatuur ei tõuse üle 70 °C, siis veel 7 V. Temperatuuri maksimaalne ülempiir on määratud selleks, et minimeerida kiirgusliku soojuseralduse mõju;
- 3 – teha kontrollkatsed, 3-4 katseseeriat sama pingega;
- 4 – mõõta kasti sees oleva õhu temperatuuri viies erinevas punktis;
- 5 – pinna temperatuuri määramiseks otsustati võtta kümne termopaari keskmine näit kui see püsib stabiilsena viie minuti jooksul;
- 6 – pinget ja voolu kaudu arvutada välja katsekeha soojendamiseks kulutatud energia hulk.

3.2. Katsete tulemused

Katse ajal salvestati andmed mälopulgale ning hiljem konverteeriti tabelisse. Iga katse kohta saadi hulk andmeid, kus on temperatuuri hetkväärtused mõõdetud kümne anduriga katseseadme pinnalt ja viie anduriga ümbritseva keskkonna erinevates punktides. Samuti fikseeriti voolutugevuse hetkväärtused 30-sekundilise intervalliga soojendamise tsükli kestel. Pinget katse ajal on konstantne. Andmetöötluse tulemusena saadi iga katseseeria jaoks pinna keskmine temperatuur katse alguses, maksimaalne saavutatud temperatuuri keskvärtus ja jahutatud pinna temperatuuri keskvärtus. Ümbritseva keskkonna temperatuurid olid mõõdetud samades ajavahemikes ning on määratud ka soojendamise ja jahtumise kestused. (tabel 3.3)

Tabel 3.3. Viie katseseeria andmed

Asend	Katseseadme mõõdetud parameeter	Pinge				
		3V	4V	5V	6V	7V
Horisontaalne	Pinna algtemperatuur, t_{k1} , °C	24,04	24,18	24,29	24,08	23,64
	Pinna maksimaalne temperatuur, t_{kmax} , °C	31,35	36,35	43,15	48,75	56,95
	Pinna lõpptemperatuur, t_{k2} , °C	24,45	24,40	24,42	24,29	23,76
	Õhu algtemperatuur, $t_{\delta 1}$, °C	23,88	23,96	24,14	23,95	23,41
	Õhu maksimaalne temperatuur, $t_{\delta max}$, °C	24,23	24,27	24,50	24,48	24,13
	Õhu lõpptemperatuur, $t_{\delta 2}$, °C	24,27	24,01	24,08	23,92	23,40
	Soojendamise aeg, τ_1 , s	2370	2310	2310	2490	2250
	Jahtumise aeg, τ_2 , s	2880	2610	3000	3300	3510
	Soojendamiseks kulutatud energia, E, J	6923	12012	19130	28544	35560
	Katseseade võimsus, P W	2,92	5,2	8,28	11,46	15,8
Vertikaalne	Pinna algtemperatuur, t_{k1} , °C	23,80	24,29	24,51	23,86	23,67
	Pinna maksimaalne temperatuur, t_{kmax} , °C	31,25	37,35	44,26	49,96	56,96
	Pinna lõpptemperatuur, t_{k2} , °C	23,99	24,33	24,30	24,02	23,78
	Õhu algtemperatuur, $t_{\delta 1}$, °C	23,68	24,06	24,09	23,69	23,46
	Õhu maksimaalne temperatuur, $t_{\delta max}$, °C	24,01	24,31	24,54	24,38	24,18
	Õhu lõpptemperatuur, $t_{\delta 2}$, °C	23,80	23,96	24,03	23,84	23,49
	Soojendamise aeg, τ_1 , s	2520	2340	2280	2370	2430
	Jahtumise aeg, τ_2 , s	2550	2670	3000	3510	3600
	Soojendamiseks kulutatud energia, E, J	7442	12486	19075	27729	38110
	Katseseade võimsus, P W	2,95	5,34	8,37	12,16	15,68

Voolu hetkväärtuse ja pinge korrutisena saadi võimsuse hetkväärtused ning korrutades mõõteintervali kestvusega, mis oli 30 sekundit on saadud kulutatud energia hetkväärtused:

$$E_i = I_i \cdot U \cdot \tau_i \quad (3.1)$$

kus E_i on kulutatud energia hetkväärtus J;

I_i – voolutugevuse hetkväärtus A;

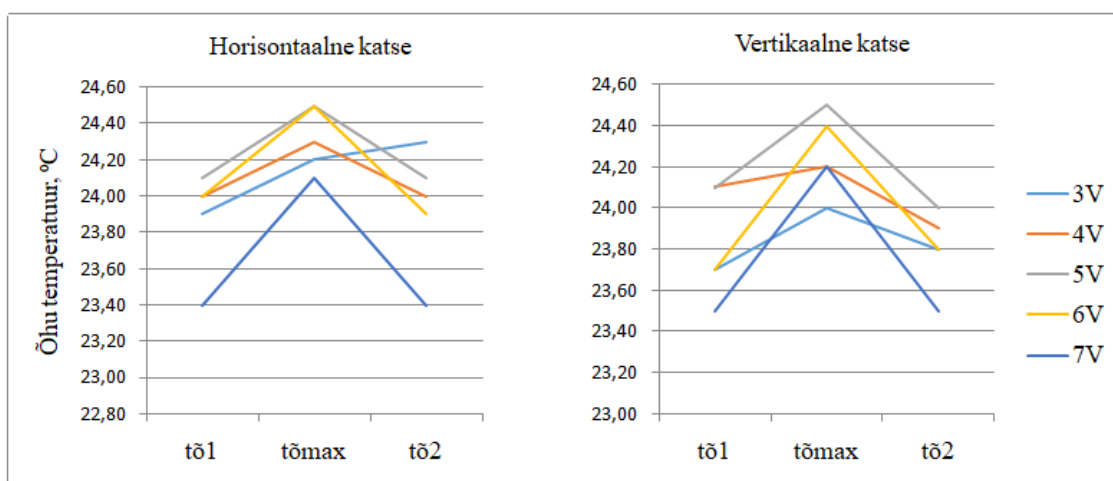
U – pinge katse kestel V;

τ_i – mõõtepunktide intervall s.

Energia hetkväärtuste summa on koguenergia, mis on kulutatud katseseadme soojendamiseks antud tingimustel $E = \sum E_i$ J. Katseseadme võimsuse P W annab kogu soojendamisel kulutatud energia jagatud soojendamise perioodi kestusega: $P = E/\tau$

Katse ajal pannakse seade kaaneta kasti, ehk õhu liikumine on piiratud külgedelt, kuid üles liigub õhk vabalt. Ümbritsev temperatuur katse alguses on sama kui laboriruumi õhutemperatuur. Kui katseseade saavutab maksimaalse temperatuuri, tõuseb ka ümbritseva õhu temperatuur kuni 0,69 °C võrra. Jahtumisel taastub õhutemperatuur algsele väärtusele

või jääb kõrgemaks/madalamaks, sõltuvalt temperatuuri muutusest laboriruumis (Joonis 3.4). Seega võib arvestada, et ümbritseva õhu vaba liikumine katse ajal on tagatud.



Joonis 3.4. Ümbritseva keskkonna temperatuuri muutus katse ajal.

Mõõtmiste tulemuste kontrollimiseks sooritatud lisakatsed pingega 5 V (tabel 3.4)

Tabel 3.4. Kontrollkatseseria andmed

Asend	Katseseadme mõõdetud parameeter	Pinge 5V				
		Katse-0	Katse-1	Katse-2	Katse-3	Katse-4
Horisontaalne	Pinna algtemperatuur, t_{k1} °C	24,29	25,33	24,71	25,10	24,18
	Pinna maksimaalne temperatuur, t_{kmax} °C	43,15	43,96	42,95	46,05	43,65
	Pinna lõpptemperatuur, t_{k2} °C	24,42	24,85	24,92	25,18	24,40
	Õhu algtemperatuur, $t_{õ1}$ °C	24,14	24,18	24,48	25,03	23,98
	Õhu maksimaalne temperatuur, $t_{õmax}$ °C	24,50	24,30	25,16	25,57	24,48
	Õhu lõpptemperatuur, $t_{õ2}$ °C	24,08	24,31	24,52	24,97	23,97
	Soojendamise aeg, τ_1 s	2310	2220	2490	2190	2130
	Jahtumise aeg, τ_2 s	3000	2780	2760	2940	2760
	Soojendamiseks kulutatud energia, E J	19130	18351	19933	18835	17556
	Katseseade võimsus, P W	8,28	8,27	8,01	8,6	8,24
Vertikaalne	Pinna algtemperatuur, t_{k1} °C	24,51	24,95	23,66	23,84	24,28
	Pinna maksimaalne temperatuur t_{kmax} , °C	44,26	45,57	44,65	45,35	44,65
	Pinna lõpptemperatuur, t_{k2} °C	24,30	25,00	23,99	24,21	24,51
	Õhu algtemperatuur, $t_{õ1}$ °C	24,09	24,83	23,86	23,69	23,94
	Õhu maksimaalne temperatuur, $t_{õmax}$ °C	24,54	25,52	24,15	24,37	24,45
	Õhu lõpptemperatuur, $t_{õ2}$ °C	24,03	24,91	23,63	23,86	24,07
	Soojendamise aeg, τ_1 s	2280	2520	2520	2640	2190
	Jahtumise aeg, τ_2 s	3000	3000	2820	2700	2940
	Soojendamiseks kulutatud energia, E J	19075	21032	21382	22545	18095
	Katseseade võimsus, P W	8,37	8,35	8,48	8,54	8,26

Võrdlemiseks on tabelisse „Kontrollkatseseeria andmed“ lisatud veerg „katse-0“ mille andmed võeti põhikatsete seeriast pingega 5 V. Kontrollkatsed eri asendites sooritati järgmises järjekorras:

esimesel päeval – horisontaalne-horisontaalne-vertikaalne-horisontaalne

teisel päeval – vertikaalne-vertikaalne-horisontaalne-vertikaalne

On näha, et soojendamistemperatuur ega katse seadistamise võimsus ei sõltu katsete järjestusest. Kolmanda horisontaalse testi tulemust, mis ületab oluliselt andmerea keskmist võib pidada erandiks. Keskmine vahe pinna maksimaalse ja ümbritseva õhu temperatuuride vahel on:

horisontaalasendis $19,2 \pm 0,9$ °C;

vertikaalasendis $20,6 \pm 0,5$ °C.

3.3. Vabakonveksiooni soojusülekande teguri arvutamine

Energia, mis siseneb süsteemi elektrivoolu toimel muundub esialgu soojuseks, mis juhtivuse teel liigub katsekeha pinnale. Seejärel soojusenergia väljub ümbritsevasse keskkonda konveksiooni ja kiirguse teel. Energia jäävuse seaduse kohaselt on võimsus:

$$P = \frac{E}{\tau} = Q_{\alpha} + Q_{\varepsilon} + Q_{\lambda} \quad (3.2)$$

Kus P on elektriline võimsus W;

E – energia, mis edastati süsteemile soojendamistsükli ajal J;

τ – soojendamise kestvus s;

Q_{α} – konvektiivnesoojusvool W;

Q_{ε} – kiirgusliksoojusvool W;

Q_{λ} – juhtivuslik soojusvool W.

Katsesilindri pinnalt eralduv kiirguslik energia arvutati valemiga (1.3):

$$Q_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot ((t_{kmax} + 273,15)^4 - (t_{\bar{0}2} + 273,15)^4)$$

kus $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ on Stefan-Boltzmanni konstant $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$;

$\varepsilon = 0,07$ – alumiiniumi kiirgustegur [2: 28];

$A = 5 \cdot \pi \cdot l \cdot d = 5 \cdot \pi \cdot 0,12 \cdot 0,016 = 0,03015$ – katseseadme pindala m^2 ;

t_{kmax} – maksimaalne temperatuuri keskväärtus °C;

$t_{\bar{0}2}$ – õhutemperatuuri keskväärtus °C.

Soojusvoolu, mis kulub silindrite siseruumala soojendamiseks saab leida valemite (2.3.1) ja (2.5) abil, ehk

$$Q_{\lambda} = \frac{\Delta t \cdot (m_{liiv} \cdot c_{liiv} + m_{Al} \cdot c_{Al})}{\tau}$$

kus c on massierisoojus;

liiva jaoks $c_{liiv} \approx 800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

alumiiniumi jaoks $c_{Al} \approx 900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

m – katseseadme valmistamise ajal mõõdetud mass;

liiva mass $m_{liiv} = 0,131 \text{ kg}$;

alumiiniumi mass $m_{Al} = 0,065 \text{ kg}$;

Δt – eelkatse käigus mõõdetud alg- ja maksimaaltemperatuuri vahe, arvestades, et eelkatse korral algtemperatuur pinnal ja silindri sees on võrdsed;

τ – soojendamise tsükli kestvus s;

katsel pingega 3V: $\Delta t = 8,18 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 2520 \text{ s}$;

katsel pingega 4V: $\Delta t = 12,46 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 2700 \text{ s}$;

katsel pingega 5V: $\Delta t = 20,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 2370 \text{ s}$;

katsel pingega 6V: $\Delta t = 26,58 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 2520 \text{ s}$;

katsel pingega 7V: $\Delta t = 33,45 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 2490 \text{ s}$.

Kuna katseseadme valmistamiseks kasutatud vilgukivi mass on väike, alla 1,5 g, arvutuste lihtsustamiseks seda arvesse ei võetud. Arvutuste tulemused on esitatud allolevas tabelis (tabel 3.5). Kiirguslik ja juhtivuslik soojuslevi ei sõltu keha asendist.

Tabel 3.5. Katsekeha kiirguslik ja soojuhtivusega edastatud soojusvool

Katseseade parameeter	Pinge				
	3 V	4 V	5 V	6 V	7 V
Kiirguslik soojusvool, Q_{ε} W	0,095	0,172	0,272	0,363	0,495
Soojusjuhtivusega edastatud soojusvool, Q_{λ} W	0,530	0,753	1,390	1,722	2,194

Konvektiivne soojusvool on kogu soojusvoolu ja kiirgusliku ning juhtivusliku soojusvoolu vahe:

$$Q_{\alpha} = P - (Q_{\varepsilon} + Q_{\lambda}) \quad (3.3)$$

Konvektiivse soojusülekanne intensiivsust iseloomustab soojusülekandeegur. Newton-Richmanni seaduse järgi (valem 1.10), teades soojusvoolu osa, mis eraldub konvektiivsel teel, katsekeha pinna maksimaalset temperatuuri ja ümbritseva keskkonna temperatuuri (tabel 3.4) ning katsekeha pindala $5 \cdot A = 0,00603 \text{ m}^2$, võib välja arvutada soojusülekandeeguri. Seejärel võib leida Nusselti, Grashofi ja Rayleigh'i sarnasuse arvud, kasutades valemeid 1.14 – 1.16. Arvutuse tulemused on esitatud allolevas tabelis (tabel 3.6).

Tabel 3.6. Katse andmetepõhjal saadud soojusülekandeegur ja sarnasusarvud

Katseseadme parameeter	Asend	Pinge				
		3 V	4 V	5 V	6 V	7 V
Katseseadme elektriline võimsus, P, W	horisontaal	2,92	5,20	8,28	11,46	15,80
	vertikaal	2,95	5,34	8,37	11,70	15,49
Katseseadme sookusülekanne võimsus, $Q_\alpha = P - Q_\varepsilon - Q_\lambda$	horisontaal	2,27	4,28	6,62	9,38	13,12
	vertikaal	2,33	4,41	6,70	9,62	12,80
Soojusülekandeegur, $\alpha = \frac{Q_\alpha}{\Delta t \cdot 5 \cdot A}, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	horisontaal	11,0	11,86	11,72	12,71	13,10
	vertikaal	10,63	11,23	11,14	12,29	12,80
Nusselti arv, $Nu = \alpha \cdot \frac{L}{\lambda}$	horisontaal	6,72	7,17	7,01	7,55	7,70
	vertikaal	48,55	50,93	49,96	54,76	56,41
Grashofi arv, $Gr = \frac{g L^3 \Delta t}{\nu^2 T_{pk}}$	horisontaal	3864	6284	9376	11527	14394
	vertikaal	1716749	2883730	4207894	5142557	6069667
Rayleigh'i $Ra = Gr \cdot Pr$	horisontaal	2694	4385	6536	8031	10020
	vertikaal	1197000	2012000	2933000	3583000	4224000

Sarnasuse kriteeriumite arvutamisel on võetud keskmine atmosfäärirõhku katseajal [14] ning määravaks temperatuuriks on võetud piirikihi temperatuur. Öhu piirikihi parameetrid: soojusjuhtivutegur λ , kinemaatiline viskoossus ν ning ka Prandtl'i arv Pr on leitud *on-line* kalkulaatori abil [16] (lisa 3).

Tabelist on näha, et soojusülekandeegur vertikaalses asendis on väiksem kui horisontaalses, mis teooriaga kooskõlas ei ole. Kusjuures Grashofi ja Rayleigh'i arvud näitavad, et vertikaalses asendis on soojuskandja voolamise intensiivsus suurem. Antud juhul ei ole võimalik statistiliselt hinnata mõõtetulemusi, kuna tehtud on üksikmõõtmised.

Kontrollmõõtmiste tulemused, mis tehti alalispingega 5 V, on sama trendiga (tabel 3.7) kuid vahe on väike.

Tabel 3.7. Kontrollkatse andmetepõhjal saadud soojusülekandevegur

Katseseadme parameeter	Asend	Pinge 5 V				
		Katse-0	Katse-1	Katse-2	Katse-3	Katse-4
Soojusülekandevegur, $\alpha = \frac{Q_{\alpha}}{\Delta t \cdot 5 \cdot A}, \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	horisontaal	11,72	11,47	11,67	11,02	11,33
	vertikaal	11,14	10,78	10,94	10,79	10,86

Tulemusele võib avaldada mõju nii mõõtmisest tulnud määramatus, kui ka välistingimused katseajal või katseseadme ehitus ja konstruktsioon.

Katsekeha geomeetiline suurus ei rahulda valemis (1.21) esitatud tingimust, ehk $D/H < 35 \cdot Gr^{-0,25}$, mis tähendab, et piirikihi paksus on silindri läbimõõdust suurem. Katseseadmes asuvad silindrid üksteisest 6 cm kaugusel ning on võimalik, et see on liiga väike vahe vabakonvektsiooni tagamiseks. Samuti vertikaalses asendis paikneb katseseadmekasti põhjal ning raskuskese asub madalamal kui horisontaalses asendis.

3.4. Vabakonvektsiooni võrrandi leidmine katseandmete põhjal

Vabakonvektsiooni võrrandi leidmiseks on kasutatud tabelarvutuse võimalusi.

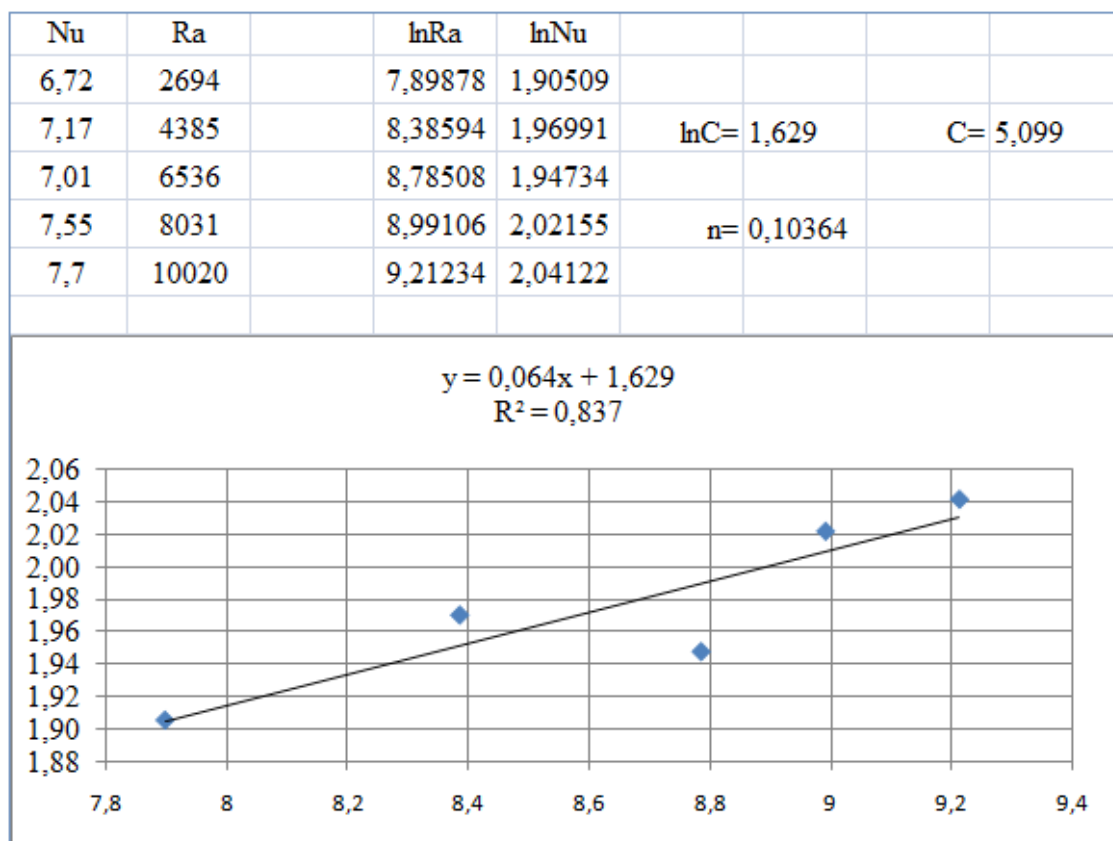
Horisontaalses asendis katsetulemust kirjeldatakse võrrandiga:

$$\ln Nu = 1,629 + 0,064 \cdot \ln(Ra)$$

$$\ln C = 1,629, \text{ kust } C = \exp(1,629) = 5,1$$

$$n = \frac{\ln Nu_{\max} - \ln Nu_{\min}}{\ln Ra_{\max} - \ln Ra_{\min}} = \frac{2,041 - 1,905}{9,212 - 7,899} = 0,06$$

Antud praktilistel tulemustel põhineva mudeli kirjeldatavus on 83,7 %. (joonis 3.5)



Joonis 3.5. Vabakonveksiooni võrrand, kui katsekeha on horisontaalasendis.

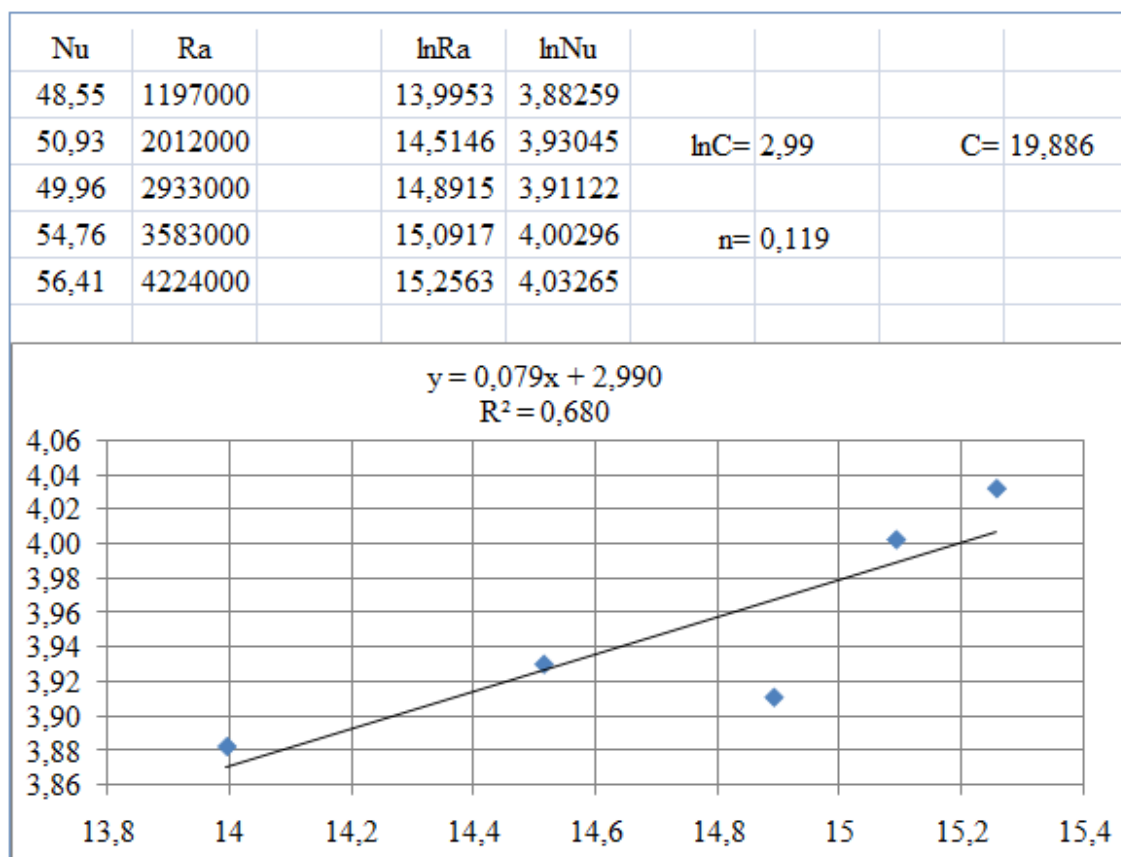
Vertikaalses asendis katsetulemus kirjeldatakse võrrandiga:

$$\ln Nu = 2,99 + 0,079 \cdot \ln(Ra)$$

$$\ln C = 2,99, \text{ kust } C = \exp(2,99) = 19,886$$

$$n = \frac{\ln Nu_{\max} - \ln Nu_{\min}}{\ln Ra_{\max} - \ln Ra_{\min}} = \frac{4,223 - 4,12}{15,256 - 13,995} = 0,08$$

Antud praktilistel tulemustel põhineva mudeli kirjeldatavus on 68 %. (joonis 3.6)



Joonis 3.6. Vabakonveksiooni võrrand, kui katsekeha on vertikaalasendis.

Tulemuseks on katseliselt leitud võrrandid:

$Nu = 5,099 \cdot Ra^{0,06}$ – horisontaalasendi jaoks;

$Nu = 19,886 \cdot Ra^{0,08}$ – vertikaalasendi jaoks.

Kuna katseliste andmete kogus ei ole piisav, on leitud võrrandite usaldusväärsus väga madal ning tõsiselt võrrelda neid klassikaliste teoreetiliste valemitega ei saa. Kuid arvutused annavad ülevaate meetoodikast.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida vabakonveksiooni silindrilise keha ümber, määrata katseliselt soojusülekande tegur ning võrrelda soojuseralduse intensiivsust vertikaalses ja horisontaalses asendis.

Praktiliste katsete sooritamiseks valmistati katseseade, mis koosneb viiest silindrist. Silindrid on võimalik paigutada kas vertikaalselt, alusele kinnitatult või horisontaalselt asetades need toele. Katseseadme soojendamiseks kasutati elektrienergiat. Katseseadmega sooritati kümme katset: viis horisontaal- ja viis vertikaalasendis, alalispingega 3 V kuni 7 V. Lisaks tehti kontrollkatsed pingega 5 V, neli rõht- ja neli püstasendis.

Nii põhikatte kui ka kontrollkatse tulemusena on soojusülekande teguri α $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ väärtused horisontaalasendis suuremad kui vertikaalses. Kuid Grashofi ja Rayleigh'i sarnasusarvud näitavad, et soojuskandja voolamine on vertikaal asendis intensiivsem. Seega antud tulemuste põhjal ei saa teooriat ei tõestada ega kõrvale lükata. Võib tõestada aga seda, et vabakonveksioon sõltub paljudest tingimustest, mille mõju tuleb arvesse võtta. Sel juhul võib avaldada mõju katseseadme silindrite vaheline kaugus, mis võib olla liiga väike. Kuna katseseade paikneb kastis selleks, et piirata ruumis oleva õhu voolamise mõju, on katseseadme raskuskeskme paiknemine püstasendi puhul madalam, mis võib konveksiooniprotsessi mõjutada. Samuti katseseadme suurus ja konstruktsioon põhjustavad määramatust temperatuuri ja võimsuse mõõtmises.

Vastavalt soojusülekande uurimise metoodikale on töös katse andmete põhjal tuletatud konveksiooni võrrandid silindri vertikaalse ja horisontaalse asendi jaoks. Võrrandite usaldusväärsus on madal, kuid antud metoodika annab ettekujutuse, kuidas empiirilisi seoseid leita ning seda võib kasutada soojusõpetuse kursusel. Samuti saab antud tööd kasutada vaba konveksiooni uurimiseks mõeldud laboratoorse katseseadme kavandamisel ja valmistamisel.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Ots, A.** (2011). Soojustehnika aluskursus: Termodünaamika. Põlemine. Soojusülekanne. Tallinn: Tallinna Raamatutrukikoda. 816 lk.
2. **Cengel, Y., Ghajar, A.,** (2015) *Heat and mass transrer. New York. McGraw-Hill.* 968 lk.
3. **Isachenko, V., Osipova, V., Sukomel, A.,** (1975) Teploperedacha. Moskva: energia. 488 lk.(vene keeles)
4. Issledovanie teplootdachi okolo gorizontalnogo tsilindta. (2013). Tomks. Tomski politehnikeskij universitet. 12 lk (vene keeles) [on-line] twirpx (15.05.2021)
5. Soojustehnika käsiraamat. (1977). Koost Mikk I. Tallinn. Valgus. 619 lk.
6. **Bejan, A., Jones, J.,** (2013) *Convection heat transfer. Durham. North Carolina. Duke University: John Wiley & Sons.* 658 lk. [on-line] twirpx (15.05.2021)
7. **Serth, W.,** (2007) *Process heat transfer principles and applications. Texas A&M University-Kingsville. Kingsville.* 755 lk.
8. Issledovanie teplootdachi pri svobodnoj konveksii. metoodiline juhend. 11 lk. [on-line] twirpx (15.05.2021)
9. **Kirsman, E.** Füüsika põhivara. Soojusnähtused. [e-õpik] <https://opik.kirsman.ee/gymna/g5/soojusnahtused/>(15.05.2021)
10. **RND 320-KA3005P** kasutusjuhend [veebileht] https://www.elfadistelec.ee/Web/Downloads/_t/ds/RND%20320-KA3005P_eng_tds.pdf (15.05.2021)
11. **Agilent 34972A** kasutusjuhend [veebileht] <https://testworld.com/wp-content/uploads/user-guide-keysight-agilent-34970a-34972a-daq.pdf> (15.05.2021)
12. Keysight Technologies. Kontrolno-izmeritelnye reshenia. (2015). Kataloog. (vene keeles) [veebileht] <http://intermera.ru/files/mydocuments/Catalogue%202015%20rus.pdf> (15.05.2021)
13. **TENMA 72-10395.** [veebileht] kasutusjuhend. <http://www.farnell.com/datasheets/2371078.pdf> (15.05.2021)
14. E-ilmajaam Tartus füüsikahoone katusel. Arhiiv [veebileht] <https://meteo.physic.ut.ee/> (15.05.2021)
15. Metrologia, standartizatsia i tehnikeskie izmerenia. (2017). praktikline juhend. Novocherkask. (vene keeles). 52 lk. [veebileht] <https://fitu.npi-tu.ru/assets/fitu/ait/files/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BA%D0%B8/11.03.02/metrologiya-praktich.zanyatiya..pdf> (26.05.2021)
16. Raschet svojstv vozduha. on-line kalkulaator [veebileht] http://www.k204.ru/exams/test/air_prop3.htm (15.05.2021)

LIHTLITSENTS

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Natalja Ajupova,

sünniaeg 18.08.1978,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

SOOJUSÕPETUSE PRAKTILINE ÜLESANNE VABAKONVEKTSIOONI UURIMISEKS

mille juhendajad on Külli Hovi ja Mart Hovi

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____ Natalja Ajupova
(allkirjastatud digitaalselt)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Küll Hovi _____
(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäev)

Mart Hovi _____
(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäev)

LISAD

Lisa 1. Katseobjektide ja selle soojendamise variantide analüüs

Soojendamise viis	Konvektiivne	Juhtivuslik		Kiirguslik
Kirjeldus	Metallsilindrit soojendada ahjus ning jahutada õhus	Metalltorusse paigaldada kütteelementi ja täita õliga	Kütekehaks kasutada vasktraati, metalltoru täita peenteralise liivaga	Asetada katsekeha infrapunalambi alla ja termoandurid kinnitada alumisele pinnale
Eelised	On lihtne. Saab katsekeha valmiskujul osta. Ahju kasutamine on ka lihtne.	Saabtubastes tingimustes elektriga kuumutada ja lasta jahutada. Andurid saab kinnitada enne katsetamist. Võib piirata õhu liikumist katse piirkonnas Võib määrata soojendamiseks kulutatud energiahulka elektrivõimsuse järgi	Saabtubastes tingimustes elektriga kuumutada ja lasta jahutada. Andurid kinnitada enne katsetamist. Piirata õhu liikumine katse piirkonnas Saab määrata soojendamiseks kulutatud energiahulka elektrivõimsuse järgi Võimalik valmistada kodustes tingimustes.	saab uurida kõiki kolme soojuslevi vormi.
Puudused	Temperatuurimõõtmine soojendamise ajal on raske. Ahju panekul ja väljavõtmisel võib tekkida turbulentne õhu liikumine. Kuumale pinnale on raske kinnitada andureid. Raske määrata soojendamiseks kulutatud energiahulka.	Raske valmistada kodustes tingimustes, vajab keevitamist. Õli võib lekkida. Müügis olevad kütteelemendid suure võimsusega ja mõõtmega Hind on üle 30 €	Traadi paigaldamise viis, elektriline isoleerimine ja otsade kinnitamine vajab arendamist. Vajab transformaatorit pinge alandamiseks On vaja ehitada karkass rõht- ja püstasend fikseerimiseks. Hind on ca 20 €	Keeruline valmistada Raske määrata kiirguse võimsust, mis kulutati katsekeha soojendamiseks. Ei sobi silindrilise keha soojendamiseks.

Lisa 2. Termopaaride testimise tulemused

Aeg	C-1 (K)	C-2 (K)	C-3 (K)	C-4 (K)	C-5 (K)	C-6 (K)	C-7 (K)	C-8 (K)	C-9 (K)	C-10 (K)	C-11 (K)	C-12 (K)	C-13 (K)	C-14 (K)	C-15 (K)	C-16 (T)
	jäa sulamistemperatuur															
11:15:00	0,22	0,02	-0,30	0,14	-0,09	-0,18	-0,40	-0,20	-0,21	-0,25	-0,17	-0,04	-0,20	-0,22	-0,05	-0,03
11:15:30	0,54	0,50	-0,30	0,31	0,03	-0,25	0,27	0,62	-0,04	0,25	0,10	0,38	0,42	0,33	0,09	-0,22
11:16:00	0,68	0,52	-0,44	0,39	0,23	-0,33	0,28	0,56	-0,24	0,26	0,39	0,29	0,40	0,46	0,13	0,02
11:16:30	1,69	0,56	0,59	0,26	0,21	1,66	0,29	0,23	0,37	0,15	0,37	0,61	0,18	0,24	0,51	-0,09
11:17:00	0,14	0,05	-0,10	-0,30	-0,16	-0,12	-0,23	-0,30	-0,28	-0,31	-0,12	-0,30	-0,30	-0,34	-0,40	-0,33
11:17:30	-0,24	-0,12	-0,38	-0,41	-0,28	-0,25	-0,35	-0,30	-0,41	-0,35	-0,37	-0,33	-0,37	-0,42	-0,39	-0,41
11:18:00	-0,08	-0,14	-0,32	-0,38	-0,25	-0,28	-0,40	-0,34	-0,38	-0,39	-0,39	-0,35	-0,42	-0,42	-0,39	-0,42
11:18:30	-0,15	-0,10	-0,36	-0,34	-0,25	-0,26	-0,40	-0,33	-0,38	-0,44	-0,43	-0,37	-0,46	-0,43	-0,44	-0,48
11:19:00	-0,09	-0,12	-0,33	-0,31	-0,27	-0,28	-0,42	-0,38	-0,40	-0,42	-0,42	-0,41	-0,48	-0,42	-0,42	-0,46
11:19:30	-0,02	-0,11	-0,37	-0,35	-0,24	-0,30	-0,43	-0,38	-0,40	-0,42	-0,42	-0,42	-0,49	-0,43	-0,44	-0,49
keskmine	0,27	0,11	-0,23	-0,10	-0,11	-0,06	-0,18	-0,08	-0,24	-0,19	-0,15	-0,09	-0,17	-0,17	-0,18	-0,29
	vee keemistemperatuur															
10:45:00	95,69	95,72	96,67	95,90	96,20	96,19	96,21	96,70	96,07	96,14	95,76	96,01	95,83	95,69	96,19	96,12
10:45:30	98,82	98,78	99,61	99,26	99,31	98,99	99,34	99,59	99,16	99,28	99,22	99,50	99,23	99,18	99,07	99,07
10:46:00	99,01	99,02	99,80	99,46	99,46	99,31	99,42	99,60	99,31	99,36	99,31	99,65	99,39	99,30	99,17	99,14
10:46:30	98,85	98,90	99,76	99,32	99,38	99,25	99,40	99,66	99,27	99,23	99,29	99,40	99,17	99,25	99,13	99,19
10:47:00	98,98	99,21	99,76	99,37	99,43	99,22	99,45	99,59	99,23	99,35	99,32	99,60	99,31	99,27	99,14	99,10
10:47:30	98,85	98,89	99,63	99,32	99,38	99,10	99,34	99,51	99,13	99,36	99,29	99,65	99,24	99,37	99,13	99,20
10:48:00	99,02	99,04	99,91	99,47	99,43	99,32	99,53	99,66	99,17	99,35	99,29	99,61	99,36	99,22	99,19	99,31
10:48:30	99,09	99,00	99,85	99,46	99,51	99,32	99,50	99,71	99,23	99,36	99,40	99,68	99,36	99,35	99,11	99,18
10:49:00	99,05	99,01	99,85	99,50	99,52	99,29	99,54	99,72	99,29	99,46	99,33	99,66	99,34	99,25	99,09	99,19
10:49:30	98,91	98,91	99,70	99,27	99,35	99,34	99,41	99,56	98,89	99,25	98,83	99,55	99,16	98,77	99,02	98,84
keskmine	98,63	98,65	99,45	99,03	99,10	98,93	99,11	99,33	98,88	99,01	98,90	99,23	98,94	98,87	98,82	98,83

Lisa 3. Soojusülekande teguri ja sarnasusarvude arvutamise näide.

Alalispinge väärtus $U := 5 \text{ V}$		+	
silindri pikkus	$l := 0.12$	atmosfäärirõhk	$p := 101188 \text{ Pa}$
silindri läbimõõt	$d := 0.016$	kinemaatiline viskoossus	$\nu_p := 16.1762 \cdot 10^{-6}$
silindri pindala	$A := \pi \cdot d \cdot l = 0.00603$	soojusjuhtivustegur	$\lambda := 2.6748 \cdot 10^{-2}$
gravitatsioonikonstant	$g := 9.81$	Prandtl'i arv	$Pr := 0.6971$
Horisontaalne asend		Vertikaalne asend	
elektriline võimsus	$Ph := 6.619$		$Pv := 6.704$
vertikaalne suurus	$Lh := 0.016$		$Lv := 0.12$
pinna maksimaalne temperatuur	$t_{p1h} := 43.15$		$t_{p1v} := 44.26$
pinna lõpptemperatuur	$t_{p2h} := 24.42$		$t_{p2v} := 24.3$
õhu temperatuur	$t_{\delta h} := 24.08$		$t_{\delta v} := 24.03$
	$\Delta th := t_{p1h} - t_{p2h} = 18.73$		$\Delta tv := t_{p1v} - t_{p2v} = 19.96$
	$T_{pkh} := \frac{t_{p1h} + t_{\delta h}}{2} + 273.15 = 306.8$		$T_{pkv} := \frac{t_{p1v} + t_{\delta v}}{2} + 273.15 = 307.3$
	$\alpha h := \frac{Ph}{\Delta th \cdot A \cdot 5} = 11.717$		$\alpha v := \frac{Pv}{\Delta tv \cdot A \cdot 5} = 11.137$
	$Nuh := \alpha h \cdot \frac{Lh}{\lambda} = 7.01$		$Nuv := \alpha v \cdot \frac{Lv}{\lambda} = 49.96$
	$Grh := \frac{g \cdot Lh^3}{\nu_p^2 \cdot T_{pkh}} \cdot \Delta th = 9375.791$		$Grv := \frac{g \cdot Lv^3}{\nu_p^2 \cdot T_{pkv}} \cdot \Delta tv = 4207893.824$
	$Pr \cdot Grh = 6.536 \cdot 10^3$		$Pr \cdot Grv = 2.933 \cdot 10^6$